621.391
П134

Г. М. МАТЛИН

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ

## оптимальных систем производственной связи

Проектирование систем производственной связи

Г. М. МАТЛИН

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ

## оптимальных систем производственной связи



Издательство «Связь»
Москва 1973

6Ф8
М33
УДК 621.391.1:658.51

**Матлин Г. М.**

М33 Проектирование оптимальных систем производственной связи. М., «Связь», 1973.

416 с. с ил.

Книга посвящена вопросам организации систем производственной связи как одной из составных частей технической базы систем управления производством. Рассмотрен входящий поток требований, излагается методика расчета эффективности функционирования сетей производственной связи. Методами теории корреляции выводятся формулы величин капитальных и эксплуатационных затрат, с помощью которых определяется укрупненный состав рассматриваемых систем.

Книга предназначена для проектировщиков автоматизированных систем управления и систем производственной связи, работников служб эксплуатации этих систем.

0362—89
М 045(01)—73 58—73 6Ф8

© Издательство «Связь», 1973 г.

Гос. публичная научно-техническая библиотека СССР
ЭКЗЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА

Д4
111999

73-36076

# ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы значительно усилилось внимание к вопросам производственной связи. Это объясняется, с одной стороны, резким увеличением оснащения промышленных предприятий и строек техническими средствами передачи информации, являющихся важным элементом автоматизированных систем управления, а с другой стороны, большим прогрессом, достигнутым самой производственной связью в области разработки и выпуска новых средств, проектирования и организации эксплуатации. Все более распространяются «большие» системы производственной связи, обслуживающие крупные промышленные и строительные объединения и включающие в себя различные виды и сети связи. Разработка и внедрение автоматизированных систем управления поставили перед разработчиками систем производственной связи и эксплуатационным персоналом новые задачи.

По данным ЦСУ СССР к началу 1972 г. в стране действовали телефонные станции, обслуживающие потребности учреждений и предприятий емкостью 2,9 млн. номеров. На промышленных предприятиях и в строительных организациях используется огромное количество диспетчерских и директорских коммутаторов, радиостанций, аппаратов производственной громкоговорящей связи и других средств оперативной передачи информации. В этих условиях становится недостаточным знание техники производственной связи, которая рассматривается в обширной литературе, появившейся в последние годы [7, 8, 17, 19, 20, 55, 112, 177 и др.]. Стала очевидной необходимость более внимательного подхода к вопросам организации систем производственной связи. Большое значение имели также работы по сетям доставки информации [134, 137 и др.], которые создали научную основу для всех работ по проблемам организации систем производственной связи. Следует также отметить, что сама постановка многих вопросов организации систем производственной связи была невозможна без соответствующего использования вычислительной техники.

Для чтения книги необходимо знание математики в объеме высшего учебного заведения, особенно теории вероятности. Чисто качественное описание вопросов организации систем производственной связи возможно, но вряд ли может удовлетворить современно-

го читателя и оказаться полезным в его практической деятельности. В данной книге для количественного описания указанных вопросов привлекаются самые различные разделы математики.

Данная книга является первой попыткой систематизированного изложения вопросов организации систем производственной связи. Автор будет глубоко благодарен всем читателям, которые откликнутся на его просьбу сообщить свои замечания, предложения и пожелания.

Следует особо подчеркнуть, что книга не охватывает и не может охватить всех вопросов организации производственной связи. Затронутые автором вопросы часто являются только постановочными и требуют дальнейшей проработки. Все это создает необозримое поле для деятельности многих исследователей.

Автор глубоко благодарен профессору В. Н. Рогинскому, давшему научную направленность работам автора и данной книге и проделавшему огромную работу в качестве ее рецензента и ответственного редактора. Воспользовавшись предоставленной возможностью, я хочу выразить благодарность профессору О. Н. Ивановой, учеником которой я смею себя считать.

Алгоритмизация ряда задач и руководство составлением программ осуществлено кандидатом физико-математических наук, доцентом А. П. Савиным. Им же была прочитана вся рукопись и сделаны очень ценные замечания. Программы расчета на ЭВМ разработаны Г. В. Павловым, Т. П. Абрамовой. Расчеты осуществлялись Т. П. Абрамовой, С. С. Сусловым, И. В. Титовой, Г. В. Павловым Им, а также В. Л. Илюшину и Л. Е. Ленской, помогавшим автору в оформлении рукописи, я приношу свою благодарность.

Все отзывы и пожелания следует направлять по адресу: Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2, издательство «Связь».

*Автор*

# ГЛАВА ПЕРВАЯ

## *Система производства и система производственной связи*

### 1.1. ПРОИЗВОДСТВО КАК СИСТЕМА

Прежде чем не только решить, но и поставить вопрос о том, что такое оптимальная система производственной связи, рассмотрим понятие «производство». С интересующих нас позиций главной особенностью производства является его иерархичность. Существует, по крайней мере, семь, весьма отличных друг от друга, уровней рассмотрения производства: 1) народное хозяйство в целом; 2) отрасль; 3) подотрасль; 4) предприятие; 5) цех, хозяйство; 6) участок, конвейер и т. п.; 7) агрегаты, машины, механизмы, рабочие бригады, отдельные рабочие. Одним из многочисленных примеров иерархичности производства может быть такой: народное хозяйство — машиностроение — приборостроение — завод — цех — конвейер — рабочее место. Естественно, что в этих условиях, говоря о системе производственной связи, следует указать, для какого уровня производства она создается.

Второй особенностью производства является его системность. В соответствии с определением, данным А. И. Бергом в [65], под системой понимается «организованное множество структурных элементов, взаимосвязанных и выполняющих определенные функции». С точки зрения такого определения на каждом уровне производство является совокупностью трех систем — физической, кибернетической и экономической. Возможно также рассмотрение производства как социальной системы.

Производство как физическая система представляет собой совокупность сырья и средств его переработки в соответствии с заданной технологией. Поскольку средства связи в технологическом процессе непосредственно не участвуют, то производственная связь не является элементом производства, рассматриваемого как физическая система. В этом состоит отличие ее от некоторых других вспомогательных хозяйств промышленных предприятий — энергетического, транспортного и т. д.

Физическая система производства наиболее полно отражает его содержание, так как объясняет не только существование практи-

чески всех реальных предметов, но и материальные или энергетические связи между ними. Изоморфными [1]) отображениями физической системы являются схемы технологических процессов, материальных потоков, энергоснабжения, транспортных путей, планы расположения оборудования и т. д.

В последние годы стало очевидным, что рассматривать производство только как физическую систему недостаточно, поскольку необходимо учитывать не только технологические процессы, но и управление ими, ибо без управления никакое производство невозможно. Кроме того, следует учитывать и экономические аспекты. До настоящего времени функции управления не отделялись от самого технологического процесса. Это можно было объяснить тем, что они были примитивны и не нуждались в отдельном рассмотрении. Усложнение производства вызвало резкое усложнение функций управления, которые в некоторых случаях достигли или даже превысили человеческие способности воспринимать, обрабатывать и использовать сведения о ходе производственных процессов. Возникла кибернетика — наука об управлении и связи, произошло отделение функции управления от производства.

Производство, рассматриваемое как кибернетическая система, представляет собой совокупность управляемой и управляющей подсистем, связанных между собой потоками информации. Информация — это сведения о каких-либо предметах, процессах или явлениях, передача которых осуществляется в виде сообщений. Можно, очевидно, считать, что информация есть изоморфное отображение предметов, процессов или явлений на некоторую материальную плоскость. С точки зрения кибернетики каждому шагу в ходе производства соответствует определенное движение информации между управляющей и управляемой подсистемами. Управляющая подсистема каждого уровня производства является управляемой для следующего уровня (рис. 1.1 и 1.2). Схема потоков информации представляет собой кибернетическое отображение процессов производства. Потоки информации динамичны; изменяются содержание и количество информации во времени и именно эти изменения и определяют переход производства на рассматриваемом уровне из одного состояния в другое. Под состоянием производства в данном случае будем понимать совокупность конкретных значений переменных, которые его характеризуют, в заданный отрезок времени. Переход из одного состояния в другое происходит не хаотически, а благодаря целенаправленным воздействиям со стороны управляющей подсистемы. Указанные воздействия получили название управляющих (команд), а процесс перевода управляемой системы в требуемое состояние путем воздействия на ее переменные назван А. И. Бергом [65] управлением.

[1]) Изоморфизм — взаимно-однозначное соответствие между двумя множествами каких-либо объектов. Изоморфными называются такие системы, в которых сохраняются соотношения между составляющими их элементами (местность и географическая карта, система управления и ее модель и т. д.) [3, 51].

Управляющие воздействия (команды) имеют четко выраженную информационную сущность, т. е. всегда существуют как сообщения. Процесс управления может включать в себя информационные и неинформационные (например, механические или электрические) процессы, так как он всегда состоит из совокупности более простых процессов, например, таких:

1. Выработка информации об управляемой подсистеме.

2. Доставка ее в управляющую подсистему.

3. Обработка информации в управляющей подсистеме путем сравнения ее с установленными критериями. На основе этого сравнения определяется рассогласование между заданными величи-

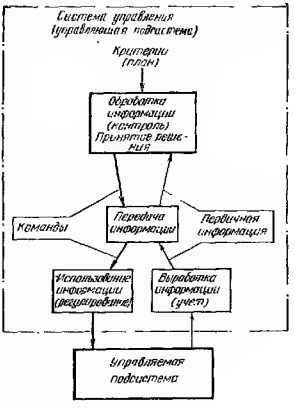



Рис. 1.1. Кибернетическая система

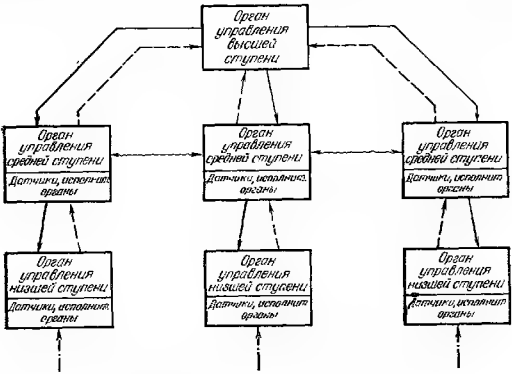



Рис. 1.2. Иерархическая кибернетическая система:
сплошная линия — командная информация; пунктирная линия — обратная связь; волнистая линия — информация согласования

нами и фактическими значениями контролируемых параметров (переменных производства). Исходя из характера и величины рассогласования, принимается решение о стратегии управления,

допустимой для данной управляющей подсистемы; рождается новая информация — управляющее воздействие.

4. Управляющее воздействие (команда) передается на исполнительные органы.

5. Исполнительные органы переводят управляемый объект в требуемое состояние.

Каждый из перечисленных «более простых» процессов, в свою очередь, состоит из нескольких последовательных операций. Процесс доставки информации, например, содержит в себе среди прочих операцию превращения ее в электрические колебания, а собственно перевод системы в требуемое состояние может включать механические или другие операции. Однако существо процесса управления всегда заключается в выработке, доставке, обработке и использовании информации. Это позволяет утверждать, что структуру управляющей подсистемы составляют *датчики* и прочие устройства ввода информации, *средства связи*, человек или *вычислительное устройство с искусственной памятью*, а также *исполнительные органы*, которые могут быть механическими, электрическими и т. д., но обязательно с устройством восприятия управляющих воздействий (команд) и их преобразования в соответствующее действие.

Заметим, что, говоря о производственной связи, мы пока всячески избегаем рассмотрения вопроса о ее составе. Все вышесказанное одинаково верно и для систем управления, использующих для доставки информации костры, язык ветряных мельниц, пеших и конных курьеров, и для систем управления, в состав которых входят самые современные технические средства оперативной связи.

Рассмотрение производства как физической и кибернетической систем оказывается недостаточным каждый раз, когда необходимо решать какие-либо вопросы, выходящие за пределы функционирования технологического процесса. Расширение, например, предприятия, автоматизация технологических процессов и другие мероприятия, влияющие на объем, номенклатуру и качество выпускаемой продукции, можно правильно провести только при рассмотрении производства как экономической системы.

Производство как *экономическая система* представляет собой совокупность его отдельных процессов и элементов, выраженных в стоимостной (денежной) форме. Входом такой системы являются капитальные и текущие затраты на создание и функционирование данного производства. Выходом ее является стоимостная оценка выпущенной продукции.

Если основной задачей производства, рассматриваемого как физическая система, является выпуск наибольшего количества продукции при заданном расходе сырья и живого труда, то при рассмотрении его как экономической системы основной задачей является максимум прибыли за счет реализации готовой продукции при заданных денежных затратах. Как правило, эти две задачи

не являются противоречивыми, но в конкретных условиях могут иметь чрезвычайно разнообразные формы.

Нетрудно видеть, что экономическая система производства, в отличие от физической, имеет дело не с реальными процессами и предметами, а с их изоморфными отображениями в экономической области. Именно в таком отображении производственная связь выступает в составе экономической системы производства в качестве одного из ее элементов. Это означает, что, регулируя экономические показатели производственной связи, можно в определенных пределах изменять экономические характеристики производства в целом. Данное обстоятельство явилось причиной широкого развития производственной связи на промышленных предприятиях, транспорте, в строительстве и сельском хозяйстве.

Все это позволяет говорить о возможности создания оптимальных систем производственной связи, т. е. таких, которые обеспечивают наилучшие экономические показатели обслуживаемых ими производств. Нахождение оптимума возможно только на базе соответствующих технико-экономических методов.

## 1.2. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

Выше было показано, что кибернетическую систему составляют управляющая и управляемая подсистемы, соединенные между собой потоками информации. В свою очередь, управляющая подсистема включает целый ряд структурных элементов, взаимосвязанных и выполняющих определенные функции (датчики, средства связи, вычислительная машина или исполнительные органы). Поэтому в соответствии с определением понятия «система» можно утверждать, что на любом производстве можно всегда выделить с и с т е м у у п р а в л е н и я, являющуюся подсистемой кибернетической системы.

Важно подчеркнуть, что определение системы управления не зависит ни от характера производства, ни от степени его автоматизации, ни от уровня его рассмотрения. Это означает, что система управления, состоящая из вышеперечисленных элементов, может быть выделена и в шахте, и в колхозе; при ручной копке траншей и на автоматической или полуавтоматической поточной линии; на рабочем месте наладчика и в целой отрасли народного хозяйства. Систему управления (датчики — глаза, уши, нос, язык, кожа; средства связи — нервная система, мозг; исполнительные органы— руки, ноги, голосовой аппарат) имеют люди. Однако, несмотря на такой общий характер понятия «система управления», в каждом конкретном случае имеются значительные отличия в количестве и качестве отдельных элементов этой системы.

Поскольку средства производственной связи предназначены для доставки информации, то именно последняя влияет на все основные характеристики этих средств, в том числе их количество, пропускную способность и способ соединения между собой.

В свою очередь, особенности систем управления отражаются на содержании, объеме и других характеристиках информации благодаря трансформации своих функций, которыми являются, как показывает их структура (см. разд. 1.1), учет (отчетность), контроль и регулирование. К функциям систем управления может быть отнесена и доставка информации, что поясняет влияние технического прогресса в области совершенствования процесса передачи информации на функционирование системы управления в целом. Механизм учета, контроля и регулирования определяется уровнем развития технологических процессов.

Управление может осуществляться только в том случае, если заданы соответствующие количественные и качественные критерии, которые в условиях производства, как правило, выражаются планом. Следовательно, планирование, а вместе с ним и нормирование, представляющее ее нормативную базу, тесно связаны с управлением.

Следует уточнить взаимосвязь между понятиями «управление» и «организация» производства. По определению С. А. Думлера [51], организация производства — это порядок, структура и способ функционирования. Порядок на производстве может нарушаться, что вызывает необходимость в управлении. Поэтому организация является статикой производства, а управление — его динамикой.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что в каждой кибернетической системе циркулирует информация, соответствующая следующим ее функциям: управление (учет, контроль и регулирование), планирование, нормирование и организация. Роль средств связи неодинакова при доставке информации перечисленных шести видов: управление требует более оперативных средств, а остальные функции — много менее оперативных, но, как правило, документальных и позволяющих передавать большие массивы самой разнообразной по форме информации. Поэтому для целей управления в настоящее время используются средства электрической связи, а для других функций — почта, курьеры. Однако подобное положение имеет место в неавтоматизированных системах управления, которые после XXIII и особенно XXIV съездов КПСС активно вытесняются автоматизированными системами.

Под неавтоматизированными системами управления понимаются такие системы, в которых подготовку данных (первичной информации), анализ ситуации и принятие решения, а также роль исполнительных органов выполняют люди. В качестве источников информации и исполнительных органов здесь выступает аппарат управления нижестоящего производства, а в качестве управляющего органа — руководство вышестоящего уровня производства. Эти системы основаны на ведении большого количества бумажных документов, которые обрабатываются, как правило, без привлечения технических средств. Для доставки информации в этих системах используются технические средства связи, однако

основной поток информации передается с помощью курьеров, почты, а также путем личного общения работников.

В автоматизированных системах управления (АСУ) процессы выработки, передачи и обработки информации механизированы, но принятие решения остается за человеком. В составе этих систем используются электронные вычислительные машины, а также технические средства сбора, обработки, хранения и доставки информации (рис. 1.3).

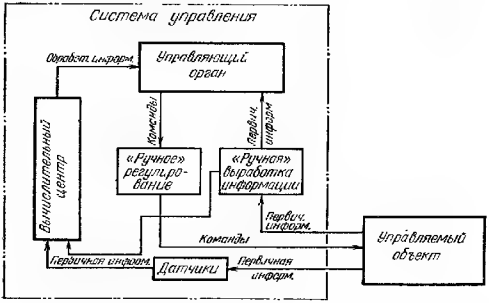



Рис. 1.3. Автоматизированная система управления

Указанные системы разделяются на информационно-справочные, обеспечивающие сбор и частичную подготовку информации для использования ее человеком, и информационно-советующие системы, выдающие информацию о ходе производства, а также подготавливающие определенные предложения и рекомендации. Оба вида систем имеют различные модификации в зависимости от применяемых устройств ввода и вывода информации.

В автоматизированных системах на ЭВМ передается часть функций учета и контроля, а также, как правило, решаются задачи планирования. В память ЭВМ при этом заводятся сведения по нормированию и организации производства, вследствие чего увеличивается роль средств связи за счет необходимости обеспечения оперативной (соизмеримой со скоростью производственного процесса) доставки информации на вычислительные центры. Доля информации, передаваемой средствами неэлектрической связи, здесь резко уменьшается. Средства связи обеспечивают также передачу информации между людьми, сохраняющими свои функции при автоматизированной системе управления.

В автоматических системах управления процессы обработки информации и принятия решений осуществляются с использованием вычислительной техники (управляющих вычислитель-

ных машин, работающих в реальном масштабе времени). В этих системах процессы выработки и использования информации полностью автоматизированы, а передача ее осуществляется, как правило, без участия человека. В настоящее время автоматические системы применяются на самых нижних уровнях производства в виде систем автоматического регулирования (САР).

Из краткого рассмотрения систем управления следует, что механизм их функционирования, степень автоматизации отдельных функций, а также способ проведения этой автоматизации предъявляют определенные требования к обслуживающим их средствам производственной связи. Должно быть обеспечено качественное и количественное соответствие между развитием системы управления и производственной связи.

## 1.3. ИНФОРМАЦИЯ В СИСТЕМАХ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

Вследствие активного вторжения кибернетики в производство усилилось внимание к изучению информации, циркулирующей на промышленных предприятиях и в строительстве. Однако до настоящего времени не существует общепринятого определения самого понятия «информация». Думается, что таким определением может стать формулировка, данная И. А. Полетаевым [120], который понимает под информацией «наличие отображения множества объектов (фактов, состояний) внешнего мира во множество сообщений, реализованных символами физического алфавита сигнала». В приведенной формулировке устанавливается вторичность информации по отношению к материи, выделяется главное диалектическое единство, определяющее информацию — единство формы и содержания.

*Форма.* Форма информации — это конкретная реализация данного сообщения в символах выбранного физического алфавита. В производственных условиях имеет место синонимия, когда одной и той же информации по содержанию соответствует несколько ее форм существования. Надо сказать, что форма информации в настоящее время изучена много лучше, чем ее содержание. Различают документированную и недокументированную формы информации.

Документированной информацией являются печатные, рукописные тексты, телеграммы, фототелеграммы, кино, магнитные и фотопленки. Эта информация в основном предназначена для перемещения во времени (т. е. время существования информации несоизмеримо больше времени, требуемого на ее передачу и восприятие).

Недокументированную информацию составляют различные сообщения, переданные голосом, разнообразными акустическими и оптическими сигналами, с помощью телекамер. Условно можно считать, что эта форма существования информации,

как правило, используется для перемещения информации в пространстве, хотя никакая информация не может передаваться мгновенно. Подразумевается, что время передачи и восприятия недокументированной информации соизмеримо со временем ее существования.

Синонимия информации делает возможным осуществить переход документированной информации в недокументированную и наоборот. Документированная информация, в свою очередь, может иметь текстовую, геометрическую, визуальную и акустическую формы. Текстовую (алфавитно-цифровую) форму имеют различные рукописные и печатные документы, книги, положения, телеграммы, фототелеграммы и т. п. материалы. В настоящее время на промышленных предприятиях и в строительстве около 99% всей документированной информации является текстовой (алфавитно-цифровой) или геометрической (чертежи). Кроме того, используются визуальная (киноленты, фотографии, видеозапись) и акустическая (звукозапись) формы, но объем такой информации незначителен. В качестве носителей алфавитно-цифровой информации все большее распространение получают перфоленты и перфокарты. Основной объем недокументированной информации составляет акустическая речевая информация, обмен которой происходит по телефонным каналам и при личном контакте работников. Кроме того, к акустической относится информация, передаваемая средствами звуковой сигнализации, объем которой на промышленных предприятиях весьма заметен. Визуальная форма недокументированной информации реализуется средствами оптической сигнализации и промышленного телевидения.

Применяемые на промышленных предприятиях системы телемеханики (телеуправление, телесигнализация, телеизмерения) основаны на передаче по линиям связи специальной информации, которая может быть как документированной, так и недокументированной в зависимости от типов используемых устройств фиксации поступающей информации.

Нетрудно представить, что соотношение между документированной и недокументированной информацией изменяется по уровням производства. Можно считать, что от предприятия и выше основной объем занимает документированная информация и чем выше уровень, тем процент этой информации в общем ее объеме выше. На нижних уровнях производства, наоборот, объем недокументированной информации достаточно большой. Важно подчеркнуть, что примерно равное соотношение между недокументированной и документированной информацией имеет место при рассмотрении производства на уровне предприятия.

Необходимо указать, что любая форма, в которой может существовать информация, допускает ее количественную оценку. Как правило, данная оценка естественна, т. е. непосредственно вытекает из конкретного вида сообщений. Руководствуясь распространенной терминологией, эту оценку можно назвать о б ъ е м о м с о-

общения, хотя, возможно, правильнее было бы назвать ее массой сообщения. Объем сообщений в текстовой (алфавитно-цифровой) форме измеряется в знаках, тыс. знаков; геометрической — в приведенных к стандартному размеру листах; визуальной — в количестве отпечатков данного формата (для фотографии) и количестве кадров или времени передачи (для промышленного телевидения); акустической — в количестве переданных знаков или продолжительностью разговора. Все эти характеристики однозначно связаны между собой, что позволяет определить целесообразность использования того или иного физического алфавита сигнала для осуществления передачи заданного сообщения. Объем сообщения определяется выбранным физическим алфавитом сигнала (способом кодирования), его избыточностью, субъективными особенностями кодировщика (отправителя) и не может служить оценкой содержания информации, а тем более его значимости для получателя. Для этого должны использоваться иные показатели.

*Количество информации.* От объема информации следует отличать количество информации, введенное К. Шенноном и послужившее основой раздела кибернетики — теории информации. Понятие количества информации позволяет точнее, чем объем информации, оценить сообщения, независимо от того, каким способом они переданы и приняты, однако и это понятие не затрагивает содержание информации.

Если какая-либо система может находиться в $z$ равновероятных состояниях, то мерой неупорядоченности данной системы, называемой энтропией, является функция, удовлетворяющая следующим условиям:

1) при $z=1$ $H=0$, так как система, находящаяся в единственно возможном состоянии, полностью упорядочена;

2) при $z>1$ величина $H$ монотонно возрастает с увеличением числа возможных состояний системы;

3) если система состоит из подсистем, каждая из которых может находиться в $z_1, z_2, \ldots$ состояниях, то должно соблюдаться равенство $H(z)=H(z_1)+H(z_2)+\ldots$, где $z=z_1+z_2+\ldots$

Указанным условиям удовлетворяет выражение:

$$H=\kappa \ln z, \tag{1.1}$$

где $\kappa$ — постоянный коэффициент, зависящий от выбора единицы измерения.

Формула (1.1) неприменима, как показал Л. Бриллюэн [22], только к системам, неупорядоченность которых по выбранному признаку зависит от способа соединения и взаимодействия их подсистем. Бриллюэном введено понятие негэнтропии, характеризующей меру упорядоченности системы и являющейся мерой нашего знания о ней:

$$-H=\kappa \ln \frac{1}{z}. \tag{1.2}$$

Нетрудно видеть, что упорядоченность системы будет увеличиваться с увеличением $1/z$. Поскольку все состояния равновероятны, то вероятность нахождения системы в каждом состоянии равна $P=1/z$. Отсюда $-H=\kappa \ln P$. В случае, если состояния системы неравновероятны, а характеризуются вероятностями $P_i$

$$-H=\kappa \sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i. \tag{1.3}$$

Если принять двоичную систему исчисления, то

$$-H=\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i. \tag{1.4}$$

Двоичная единица измерения получила название «бит». Очевидно, что чем больше величина негэнтропии, тем меньше неупорядоченность системы. Следовательно, задачей управления является постоянное введение в систему негэнтропии, что позволяет увеличить знания о ней, сделать ее более определенной, упорядоченной. Степень увеличения прироста упорядоченности системы называется количеством информации, которая равна

$$J=H_{i-1}-H_i, \tag{1.5}$$

где $H_{i-1}$ — энтропия системы при $(i-1)$-м шаге управления, когда система могла находиться в $z$ возможных состояниях; $H_i$ — энтропия системы при $i$-м шаге управления, когда было установлено, что система может находиться в $z_0$ возможных состояниях ($z_0<z$); $J$ — количество информации, бит.

Из ф-лы (1.5) следует, что

$$J=\sum_{i=1}^{z} P_i \log_2 P_i-\sum_{i=1}^{z_0} P_{0i} \log_2 P_{0i}, \tag{1.6}$$

где $P_i$ — вероятности нахождения системы в $i$-м состоянии, когда общее количество этих состояний равно $z$; $P_{0i}$ — вероятности нахождения системы в $i$-м состоянии, когда общее количество этих состояний равно $z_0$.

Можно установить некоторые приближенные соотношения между объемом сообщений и количеством информации. Данные о вероятностях появления отдельных букв в текстах русского языка, полученные А. А. Харкевичем [168], Д. С. Лебедевым и В. А. Гармаш [81], позволили установить, что энтропия одной буквы (включая пробелы между словами) равна примерно 4,36 бит. Поэтому информация, содержащаяся в каком-либо русском тексте (сообщении) определенного объема $V$, равна произведению количества букв в этом объеме на энтропию одной буквы $h_1$, т. е.

$$J_v=h_1 V_i, \text{ бит}, \tag{1.7}$$

где $J_v$ — количество информации; $V_i$ — количество букв в $i$-м сообщении (объем сообщения).

При этом, однако, не учитываются связи, существующие между двумя, тремя и т. д. буквами, между отдельными словами, фразами. Указанные связи резко уменьшают неопределенность текста, а следовательно, и количество информации, которое можно из данного текста почерпнуть. Как указывают А. М. Яглом и И. М. Яглом [183], значение предельной энтропии $h_\infty$, приходящейся на одну букву русского языка, в настоящее время не определено, но есть основание полагать, что оно находится в пределах от 0,7 до 1 бит. Для сравнения укажем, что полученные Д. С. Лебедевым и В. А. Гармаш [81] значения энтропии для двух буквенных и трехбуквенных сочетаний русского литературного текста соответственно равны $h_2 \approx 3{,}5$ бит и $h_3 \approx 3{,}0$ бит.

В устной речи (речевые сообщения) имеется еще большая избыточность, чем в текстовых сообщениях, из-за различных повторений, неравномерности речи (наличия пауз), ограниченности словаря и т. д. С учетом этих обстоятельств среднее количество «смысловой» информации, содержащейся в устной речи за отрезок времени в 1 с, находится в пределах от 0,7 до 3,3 бит [183]. Дополнительная информация живой речи (интонация, ударения, громкость, тембр, акцент и т. д.) по грубой оценке составляет в среднем 75% от смысловой информации (30% — при очень быстром разговоре и 150% — при очень медленном). Таким образом, количество информации, содержащейся в устной речи, переданной за $T$с, приближенно равна:

$$J_T = 1{,}75 h_T T, \tag{1.8}$$

где $J_T$ — количество информации; $h_T$ – энтропия «смысловой» устной речи за 1 с; $T$ — объем информации, содержащейся в данном устном сообщении, выраженный в секундах.

В системах промышленного телевидения энтропия одного элемента изображения $h_{TV}$ по грубой оценке находится в пределах от 0,54 до 2,53 бит (если различаются 64 разных градации яркости элемента), причем для бедных деталями изображений (например, лицо крупным планом) энтропия значительно меньше, чем для изображений с большим количеством различных деталей [183]. Так как число элементов телевизионного изображения огромно, то и количество информации, передаваемой системами телевидения, весьма велико и составляет

$$J_{TV} = h_{TV} Z, \text{ бит}, \tag{1.9}$$

где $J_{TV}$ — количество информации, содержащейся в телевизионном сообщении (кадре); $h_{TV}$ – энтропия одного элемента изображения; $Z$ — количество элементов изображения в кадре; $Z \approx 625$ строк $\times$ 500 линий $= 312\,500$).

Так как телевизионные изображения передаются со скоростью 25 кадров в секунду, то за время $T$с передается количество информации:

$$J_T = 25 J_{TV} T, \text{ бит}. \tag{1.10}$$

Предполагается, что для цветных телевизионных сообщений количество информации примерно равно удвоенному количеству информации, содержащейся в соответствующем черно-белом изображении. Энтропия одного элемента фототелеграфного сообщения по имеющимся оценкам находится в интервале от 0,06 до 0,23 бит.

*Содержание (семантика) информации.* Ни объем сообщения, ни количество информации не учитывают ее содержательной (семантической) стороны. Теории, которая бы позволяла количественно оценивать содержание информации, а тем более ее ценность, в настоящее время не существует. При функционировании производства в нем циркулирует информация по планированию, нормированию, управлению (учет, контроль, регулирование) и организации производства, которая может быть названа информацией по функциям. Проведение подобной классификации информации весьма удобно, так как она непосредственно вытекает из определения кибернетической системы и позволяет оценить соотношение между отдельными функциями по информационному критерию. Данное соотношение подается оптимизации по отдельным видам производства и его уровням. Поэтому информационная оценка отдельных функций кибернетической системы дает возможность установить отклонение от оптимума.

В качестве примера в табл. 1.1 приводится полная классификация информации в строительстве по функциям, разработанная институтом Гипротис Госстроя СССР [101]. Данная классификация использовалась рядом организаций при исследовании потоков информации в строительных организациях и обработки полученного статистического материала на счетно-перфорационных машинах. Однако она при всех ее достоинствах не позволяет оценить загрузку информацией отдельных функциональных органов управляющей подсистемы (производственного, планового, технического и других отделов, бухгалтерии и т. д.).

На практике применяется другой способ классификации информации – по участкам хозяйственной деятельности. В данном случае выделяются следующие вопросы:

1. Основная деятельность (в строительстве — подрядные работы).
2. Труд и заработная плата.
3. Новая техника.
4. Механизация трудоемких работ.
5. Себестоимость.
6. Основные фонды и собственные капитальные вложения.
7. Финансы.
8. Материально-техническое снабжение.
9. Проектно-сметная документация.
10. Организация производства и его обслуживание.

В табл. 1.2 в качестве примера приводится классификация информации по участкам хозяйственной деятельности в строительстве, разработанная институтом Гипротис Госстроя СССР [101].



Г. Ф. Пуеличнов
научно-техническая
библиотека ЦНИИС

Таблица 1.1

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПО ФУНКЦИЯМ

| Планирование | Учет и отчетность | Контроль | Регулирование | Нормирование | Организация |
|---|---|---|---|---|---|
| 00. Контрольные цифры | 20. Первичные документы (в учете и отчетности), предназначенные для дальнейшей обработки | 40. Прогноз по отклонениям | 50. Ходатайство об изменении плана, техдокументации, выделении дополнительных фондов, лимитов и т. д. | 70. Инструктивные указания по применению норм расценок, заполнению форм по учету, планированию и т.п. | 90. Запросы, разъяснения по организационным вопросам и хозяйственной деятельности |
| 01. Письма-заявки на выполнение годовых объемов работ, перепнска при формировании годового плана | 21. Разработочные ведомости (таблицы, журналы); расчетные ведомости (журналы, ордера); накопительные ведомости (книги учета и т. п.) | 41. Акты проверок | 51. Изменение и корректировка плана техдокументации, выделение дополнительных фондов, лимитов | 71. Нормы | 91. Справки по организационным вопросам |
| 02. Протоколы согласования планов и объемов выполняемых работ | 22. Государственная отчетность (предусмотренная ЦСУ СССР) | 42. Объяснения по актам проверки и принятия мер к исправлению | 52. Отказ, запрещение внесения изменений в план, техническую документацию | 72. Цены | 92. Приказы, распоряжения, извещения по организационным вопросам и хозяйственной деятельности |
| 03. Проекты плана и заявки | 23. Прочая отчетность (не предусмотренная ЦСУ СССР, но периодически представляемая по определенным формам) | 43. Претензии и предупреждения | 53. Согласие на внесение частичных изменений в план, техническую документацию | 73. Инструкции, стандарты, техусловия, каталоги | 93. Запрос по организационным вопросам |
| 04. Расчетные материалы и обоснования к проекту плана | 24. Справочная аналитическая отчетность о хозяйственной деятельности подчиненных организаций | 44. Извещения о санкции | 54. Изменение договорных условий, дополнительные соглашения | 74. Проект норм | 94. Разъяснение по организационным вопросам |
| 05. Предварительный план | 25. Справки и доклады о хозяйственной деятельности | 45. Рекламации | 55. Просьба о передаче, принятии, выполнении объема работ или ресурсов (без изменения утвержденного плана) | 75. Проект цен | 95. Коллективные договора |
| 06. Утвержденные планы и поэтапные задания | 26. Первичные документы (требования, разовые заявки на получение материалов, механизмов, автомашин, доверенности и т. п.), не предназначенные к дальнейшей обработке | 46. Ходатайство об ускорении и принятии мер к выполнению работ, обязательств и г. д. | 56. Просьба об отпуске или изготовлении материалов | 76. Проект инструкции | 96. Протоколы согласований, совещаний по оргвопросам |
| 07. Расчетные материалы и обоснования к утвержденным планам | 27. Извещения об окончании работ | 47. Запрос на информацию | 57. Согласие, разрешение на выполнение, передачу, принятие объема работ или ресурсов | 77. Приказы и распоряжения по различным нормативным документам | 97. Приказы и распоряжения по личному составу и правилам внутреннего распорядка |
| 08. Оперативные задания | 28. Извещения и выписки банка о состоянии расчетных и ссудных счетов | 48. Анализы производственно-хозяйственной и финансовой деятельности | 58. Запрещение, отказ на выполнение, передачу, принятие объема работ или ресурсов | 78. Тарифные и должностные ставки | 98. Обязательства |
| 09. Согласованные планы | 29. Запросы и замечания вышестоящей организации | 49. Приказы и указания по производственно-хозяйственной и финансовой деятельности | 59. Указания о выполнении, передаче, принятии объема работ или ресурсов | | |
| 10. Проекты договоров | 30. Поручения по перечислению средств | | 60. Протоколы согласований, совещаний, разногласий | | |
| 11. Согласованные договора | 31. Сводные платежно-расчетные документы, предназначенные для дальнейшей обработки | | 61. Указания о необходимости выполнения работ (строительно-монтажные работы), разработка документов согласования | | |

*Продолжение*

| Планирование | Учет и отчетность | Контроль | Регулирование | Нормирование | Организация |
|---|---|---|---|---|---|
| 12. Утвержденные договора | 32. Приказы о передаче и списании материалов и основных средств | | 62. Указания о мерах по ликвидации допущенных отклонений | | |
| 13. Проекты календарных графиков выполнения работ | | | 63. Переадресовка материалов, поставщиков | | |
| 14. Согласованные графики | | | 64. Сообщение о введении новых или изменении ранее действующих инструктивных материалов, стандартов, ГОСТ и т. п. | | |
| 15. Утвержденные графики выполнения работ | | | 65. Документы, направленные на согласование | | |
| 16. Стройфинплан | | | 66. Согласованные документы | | |
| | | | 67. Справка о потребностях | | |

*Трудоемкость обработки информации.* Вся информация, циркулирующая на производстве, так или иначе подлежит обработке. Как указывалось выше, обработка информации в неавтоматизированных системах производится людьми, в автоматизированных — людьми и ЭВМ, а в автоматических — ЭВМ. Очень большое значение для определения численности управленческого персонала, целесообразности применения ЭВМ на том или ином предприятии и решения целого ряда вопросов, включая некоторые вопросы организации производственной связи, имеет трудоемкость обработки информации.

В соответствии с исследованиями, проведенными Челябинским политехническим институтом и опубликованными в [88], все операции обработки информации могут быть приведены к действиям сложения двух четырехзначных чисел с помощью следующих коэффициентов:

| | |
|---|---|
| простая запись четырехзначных чисел | — 0,2 |
| сложение и вычитание | — 1,0 |
| умножение | — 3,3 |
| деление | — 3,6 |
| логические операции | — 0,2 |

Трудоемкость обработки информации может быть также выражена во времени, требующемся для ее осуществления. В табл. 1.3 приводятся данные о среднем времени обработки информации, полученные Ю. И. Макарским [88] в результате обследования информации на ряде машиностроительных предприятий страны. Естественно, что в данном случае можно говорить только о средних величинах времени обработки информации, имея в виду, что разброс отдельных значений от его среднего может быть очень значительным.

*Обследование потоков информации.* Каждая кибернетическая система обладает целым рядом особенностей, которые отличают ее от других систем. Эти отличия проявляются и в потоках информации, циркулирующей на предприятии. Поэтому обследование потоков информации на предприятии — обязательный этап на пути совершенствования существующих или разработки автоматизированных систем управления.

Любое обследование информации включает в себя установление объемов сообщений по функциям и сторонам хозяйственной деятельности, периодичности, направлениям циркуляции. Существуют различные методики проведения таких обследований, но наиболее эффективными из них оказались те, которые предусматривают применение для обработки статистического материала о потоках информации электронно-вычислительной или счетно-перфорационной техники.

| Подрядные работы | Труд и заработная плата | Новая техника | Механизация трудоемких работ | Себестоимость |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 00. Характеристики хозяйственной деятельности (в том числе баланс) | 10. Общие показатели по труду и зарплате | 20. Развитие и внедрение новой техники | 30. Наличие, состав и движение механизмов | 40. Себестоимость строительно-монтажных работ |
| 01. Состав подрядных работ по объектам, исполнителям и источникам финансирования | 11. Наличие и состав работающих | 21. Новые виды продукции, конструкций, материалов | 31. Использование механизмов по времени | 41. Затраты на материалы |
| 02. Титульные списки объектов | 12. Движение рабочей силы | 22. Изобретательство | 32. Выработка механизмов в натуральных выражениях | 42. Основная заработная плата |
| 03. Внутристроечные титульные списки | 13. Использование рабочего времени | 23. Поступление рационализаторских предложений | 33. Механизация основных видов работ | 43. Расходы по эксплуатации машин и механизмов |
| 04. Субподрядная эксплуатация строительных машин | 14. Фонд заработной платы | | 34. Обслуживание и текущий ремонт | 44. Прочие прямые затраты |
| 05. Услуги по механизмам и транспорту | 15. Материальное стимулирование | | 35. Наличие, состав и движение автотранспортных средств | 45. Административные расходы |
| 06. Незавершенное производство | 16. Упорядочение заработной платы | | 36. Потребность в транспорте | 46. Потери и непроизводительные затраты |
| 07. Качество выполняемых работ | 17. Выработка и выполнение норм | | 37. Основные показатели работы автотранспорта | 47. Расходы по командировкам |
| 08. Ввод в действие и недоделки | 18. Подготовка рабочих кадров и повышение квалификации | | 38. Потребность в стройме-ханизмах | 48 Прочие накладные расходы |
| 09. Физические объемы работ по объектам и отдельные объекты | 19. Штаты и смета административно-хозяйственного персонала с расчетами | | | |



Таблица 1.2

ПО УЧАСТКАМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

| Основные средства и собственные капиталовложения | Финансы | Материально-техническое снабжение | Проектно-сметная документация | Организация производства и его обслуживание |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 50. Наличие и движение основных средств | 60. Денежные средства, кредиты банков | 70. Определение потребности в материальных ресурсах | 80. Техническая документация | 90. Техника безопасности |
| 51. Износ и начисление амортизации основных средств | 61. Расчеты с поставщиками и подрядчиками, подотчетными лицами, разными дебиторами и кредиторами | 71. Доставка | 81. Сметная документация | 91. Лимиты на легковой транспорт |
| 52. Собственные капиталовложения | 62. Переоценка материальных ценностей | 72. Хранение | 82. Договора, дополнительные соглашения сметы к ним по проектным работам | 92. Пожарно-сторожевая охрана |
| 53. Титульные списки собственных капиталовложений | 63. Финансирование собственных капиталовложений и проектно-изыскательских работ | 73. Импортные поставки | 83. Титульные списки по проектно-изыскательским работам | 93. Технология производства |
| 54. Внутристроечные титульные списки собственных капиталовложений | 64. Оборотные фонды | 74. Обеспечение технологическим оборудованием (устанавливаемое оборудование) | 84. Проектно-изыскательские работы | 94. Организация труда |
| 55. Капитальный ремонт | 65. Финансовые результаты | 75. Обеспечение машинами и оборудованием для эксплуатационных нужд | 85. Платежно-расчетные операции по проектной документации | 95. Жилищный фонд, его благоустройство и населенность |
| | 66. Расчеты с бюджетом и соцстрахом | 76. Обеспечение инвентарем | 86. Единичные расценки на строительно-монтажные работы, калькуляции | 96. Коммунальное хозяйство |
| | | 77. Расход материальных ресурсов | | 97. Социалистическое соревнование и коллективные договора |
| | | | | 98. Разъяснения, указания, запросы по нормативной документации и отчетной информации |
| | | | | 99. Характеристика организации |

Таблица 1.3

СРЕДНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

| Наименование операций | Среднее время обработки информации, с |
|---|---|
| Расчеты и записи, приведенные к действию сложения двух четырехзначных чисел | 9 |
| Поиск исходной информации | 17 |
| Измерение, взвешивание, штучный счет | 300 |
| Запись вновь возникающей информации | 2 |
| Прием письменного сообщения (документа) | 220 |
| Передача письменного сообщения | 730 |
| То же, совместно с материальными ценностями (сопровождающей документации) | 210 |
| Утверждение и согласование основного сообщения (без операций приема и передачи) | 20 |
| То же, для копий основного документа | 10 |
| Передача письменного сообщения внутри подразделения | 310 |
| Прием устного сообщения | 355 |
| Передача устного сообщения | 660 |

Таблица 1.4

ОБЪЕМЫ СООБЩЕНИЙ НА МИНСКОМ ТРАКТОРНОМ ЗАВОДЕ

| Содержание информации | Объемы сообщений, млн. знаков в месяц |
|---|---|
| Материально-техническое снабжение | 22,3 |
| Труд и заработная плата | 16,9 |
| Затраты на производство | 10,2 |
| Реализация готовой продукции | 5,0 |
| Финансы | 1,4 |
| Основные средства | 0,4 |
| Технико-экономическое планирование: | |
| цеховое | 0,4 |
| заводское | 0,4 |
| Технологическая подготовка | 3,7 |
| Планирование и учет | 4,5 |
| Контроль и регулирование | 6,0 |

В качестве примера в табл. 1.4 приводятся данные обследования потоков информации на Минском тракторном заводе, заимствованные у Ю. И. Макарского [88]. В год на этом заводе перерабатывается 852 млн. знаков информации. В табл. 1.4 сохранена классификация информации, принятая в первоисточнике.

В табл. 1.5 приводятся данные о распределении потоков информации по направлениям, полученные в результате обследования ряда строительных организаций [94]. Обследования проводились с целью определения областей эффективного применения вычислительной техники и связанных с нею средств передачи информации. В других случаях подобные обследования могут проводиться для совершенствования организационной структуры, информационной системы и других целей. Однако всегда объем и продолжительность обследований должны быть установлены исходя из той точности, которая необходима для достижения поставленной цели. Механизм оценки

Таблица 1.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА ИНФОРМАЦИИ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

| Наименование строительной организации | Объем выборки, млн. знаков | Процент в объеме выборки информации | | |
|---|---|---|---|---|
| | | внутренней | входящей | исходящей |
| Общестроительный трест | 127,8 | 22,2 | 36,8 | 41,0 |
| Специализированный трест (инженерные коммуникации) | 54,5 | 52,1 | 22,1 | 25,8 |
| Домостроительный комбинат | 50,8 | 55,6 | 18,9 | 25,5 |
| Трест «Строймеханизация» | 50,2 | 56,1 | 19,8 | 24,1 |
| Строительное управление общестроительного треста | 21,0 | 27,6 | 50,4 | 22,0 |
| Строительное управление специализированного треста (инженерные коммуникации) | 20,0 | 33,0 | 50,4 | 16,6 |
| Управление механизации | 16,9 | 32,7 | 49,3 | 18,0 |

полученных результатов рассмотрим на примере обследования строительных организаций, данные которого приведены в табл. 1.5. Все полученные статистические материалы проверяются на надежность (вероятность получения данного результата) с помощью известных соотношений математической статистики:

$$Z_\alpha = \frac{P}{v}\sqrt{n}, \qquad (1.11)$$

где $P$ — показатель точности, %; $v = 100\sigma/M$ — коэффициент изменчивости, %; $M$ — математическое ожидание исследуемой случайной величины объема информации за рассматриваемый отрезок времени; $\sigma$ — среднее квадратическое отклонение; $n$ — объем выборки (число наблюдений); $Z$ — нормированный показатель достоверности; $\alpha$ — вероятность получения данного результата (статическая надежность), определяемая как

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Z_\alpha} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

по таблицам интеграла Лапласа.

Из ф-лы (1.11) следует, что требуемое количество наблюдений (например, количество организаций, в которых необходимо провести обследование потоков информации) при заданной надежности получения результата, равно

$$n_\alpha = \frac{v^2 Z_\alpha^2}{P^2}. \qquad (1.11')$$

Обычно величина $\alpha$ принимается равной 0,9 или 0,95, а величина $P$=5 или 10%. При $\alpha$=0,9 $Z_{0,9}$=1,64, а при $\alpha$=0,95 $Z_{0,95}$=1,96.

Расчеты, произведенные по материалам статистики и приведенные в табл. 1.5, показали, что вероятности полученного распределения информации специализированных трестов и домостроительных комбинатов (ДСК) по направлениям (при точности 5%) оказались равными: 0,97 — для внутренней информации; 0,72 — для входящей информации; 0,98 — для исходящей информации.

С вероятностью 0,9 годовой объем сообщений, циркулирующих в строительных специализированных трестах и ДСК, будет находиться в доверительном интервале (тыс. знаков) $46\,000 \leqslant M \leqslant 57\,650$, а среднее квадратическое отклонение в интервале $1650 \leqslant \sigma \leqslant 12\,750$. Для строительных управлений доверительные интервалы: $14\,000 \leqslant M_{\text{су}} \leqslant 24\,600$; $1520 \leqslant \sigma_{\text{СУ}} \leqslant 11\,700$

На основе оценки величин вероятностей распределения информации и ширины доверительных интервалов делается вывод об окончании или направлении дальнейших исследований. Для рассматриваемого примера объем исследований был признан достаточным.

В табл. 1.6 приводятся данные о распределении информации, характеризующей хозяйственную деятельность общестроительных трестов и строительного управления. Из таблицы следует, что более 80% информации приходится на по-

Таблица 1.6

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПО СТОРОНАМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ТРЕСТОВ И УПРАВЛЕНИЙ

| Стороны хозяйственной деятельности | Общестроительный трест | | | | Общестроительное управление | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Распределение информации по | | | | | | | |
| | документам | | знакам | | документам | | знакам | |
| | кол-во тыс. док. | % | кол-во млн.зн. | % | кол-во тыс. док. | % | кол-во млн.зн. | % |
| Подрядные работы | 8,6 | 6,4 | 13,2 | 10,3 | 2,6 | 7,05 | 2,7 | 13,1 |
| Труд | 21,7 | 16,1 | 43,1 | 33,8 | 7.5 | 20.4 | 6,0 | 29,0 |
| Новая техника | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 3,6 | 0,1 | 0,46 |
| Механизация трудоемких работ | 11,3 | 8,4 | 4,2 | 3,3 | 1,3 | 3,6 | 0,3 | 1,19 |
| Себестоимость | 1,5 | 1,1 | 0,6 | 0,5 | 0,9 | 2,4 | 0,1 | 0,58 |
| Основные средства и собственные капитальные вложения | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0,18 | 0,05 | 0,20 |
| Финансы | 31,9 | 23,7 | 15,7 | 12,2 | 6,5 | 17,75 | 1,0 | 4,9 |
| Материально-техническое снабжение | 44,6 | 33,2 | 38,1 | 29,8 | 14,2 | 38,45 | 8,8 | 41,74 |
| Проектно-сметная документация | 13,2 | 9.8 | 9,3 | 7,3 | 2,1 | 5,85 | 1,75 | 7,97 |
| Организация производства | 0,6 | 0,4 | 2,2 | 1,7 | 0,3 | 0,72 | 0,2 | 0,86 |
| Итого | 134,6 | 100 | 127,8 | 100 | 36,8 | 100 | 21,0 | 100 |

просы труда, финансов и материально-технического снабжения, где применение электроники вычислительной техники возможно уже в настоящее время. В табл. 1.7 приведено распределение информации по функциям этих же организаций.

Кроме установления распределения информации по отдельным видам содержания, а также по направлениям, при обследовании определяется периодичность ее возникновения. Особенно большое значение периодичность поступления имеет для недокументированной информации, где изменения ее объемов во времени особенно значительны (см. гл. 2). Требуемое количество аппаратуры и линий рассчитывается с учетом этих неравномерностей.

Таблица 1.7

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПО ФУНКЦИЯМ ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ТРЕСТОВ И УПРАВЛЕНИЙ

| Функция | Общестроительный трест | | | | Общестроительное управление | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Распределение функции по | | | | | | | |
| | документам | | знакам | | документам | | знакам | |
| | кол-во тыс. док. | % | кол-во млн.зн. | % | кол-во тыс. док. | % | кол-во млн.зн. | % |
| Планирование | 21,7 | 16,2 | 13,0 | 10,25 | 5,2 | 14,03 | 3,2 | 15,2 |
| Учет и отчетность | 88,4 | 65,6 | 86,5 | 67,6 | 28,7 | 77,9 | 11,0 | 52,6 |
| Контроль | 10.5 | 7.8 | 8.0 | 6.3 | 1,1 | 2.96 | 1,1 | 5.4 |
| Регулирование | 12,2 | 9,1 | 2,5 | 1,9 | 1,3 | 3,53 | 0,7 | 2,8 |
| Нормирование | 0,5 | 0,3 | 15,7 | 12,3 | 0,1 | 0,38 | 4,8 | 23,0 |
| Организация | 1,3 | 1,0 | 2,1 | 1,65 | 0,4 | 1,2 | 0,2 | 1,0 |
| Итого | 134.6 | 100 | 127,8 | 100 | 36.8 | 100 | 21,0 | 100 |

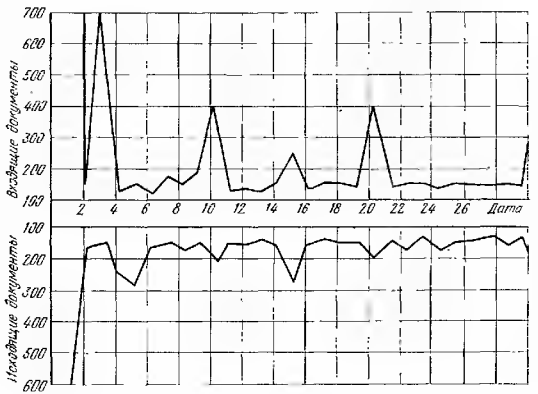



Рис. 1.4. Колеблемость объемов информации по отдельным дням месяца для одного строительного управления

Если рассматривать совокупность документов в их движении во времени, то оказывается, что здесь имеется значительная колеблемость потоков информации как по отдельным дням, так и по неделям, декадам, месяцам, кварталам, го-

дам. Для получения возможности учёта колеблемости количественно (что необходимо для расчета тех средств связи, которые предназначаются для передачи этой информации) требуется знать закон распределения вероятности того или иного объема сообщения в единицу времени. Единица времени может быть выбрана произвольно, в зависимости от содержания той или иной задачи. Однако для упрощения сбора требуемой статистики и пользования получёнными результатами обычно за такую единицу принимаются сутки.

Таблица 1.8

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДОКУМЕНТОВ ПО ДНЯМ МЕСЯЦА

| Пределы, в которых заключено количество документов в сутки | Число случаев $m_i$, когда количество документов в сутки попадает в данные пределы | | | Частость события $\hat{p}\ m_i/62$ |
|---|---|---|---|---|
| | входящие | исходящие | всего | |
| 100÷150 | 23 | 21 | 44 | 0,711 |
| 151÷200 | 2 | 8 | 10 | 0,161 |
| 201÷250 | 1 | 1 | 2 | 0,032 |
| 251÷300 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 301÷350 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 351÷400 | 1 | 0 | 1 | 0,016 |
| 401÷450 | 2 | 0 | 2 | 0,032 |
| 451÷500 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 501÷550 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 551÷600 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 601÷650 | 0 | 1 | 1 | 0,016 |
| 651÷700 | 2 | 0 | 2 | 0,032 |
| Итого | 31 | 31 | 62 | 1,000 |

Колеблемость объемов сообщений по отдельным дням месяца для одного строительного управления, заимствованная из материалов института Гипротис [101], представлена на рис. 1.4. Закон распределения вероятности появления того или иного объема информации в течение рассматриваемого дня может быть получен путем накапливания статистики. Так, для месячного потока информации, представленного на рис. 1.4, статистика будет иметь вид, приведенный в табл. 1.8 и на рис. 1.5.

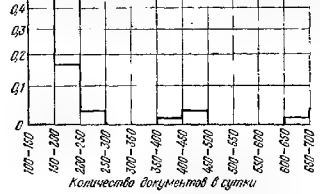



Рис. 1.5. Статистическое распределение объемов информации по отдельным дням месяца по данным рис. 1.4

В заключение исследований по статистике должны быть проверены различные гипотезы о соответствии опытных данных теоретическим распределениям.

Количественное описание периодичности поступления информации сводится к изучению изменения (колеблемости) объемов сообщений во времени с помощью законов распределения случайных величин (случайными величинами в данном случае являются объемы сообщений за сутки). Знание этих законов позволяет прогнозировать величину ожидаемого потока информации за любой, интересующий отрезок времени.

## 1.4. СИСТЕМА СВЯЗИ КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*Связь как техническая база систем управления* Поскольку существо любой системы управления составляет переработка информации, ни одна такая система (неавтоматизированная, автоматизированная, автоматическая) не может функционировать без необходимого комплекса средств связи. Военачальник, не имеющий сведений о местонахождении подчиненных ему войск, диспетчер, который не может передать команды аварийной бригаде об устранении повреждения в энергосети, шофер, не видящий дороги, по которой едет автомашина, человек с расстройством нервной системы — все это примеры систем управления, в которых отсутствуют средства, предназначенные для доставки информации. Эти средства могут быть самыми разнообразными: костры, ветряные мельницы, почтовые голуби, курьеры, человеческая речь, передаваемая устно, письменно, по телеграфу, телефону, радио, флажками и т. д. Однако по мере усложнения систем управления средства доставки информации также имеют тенденцию к усложнению. В настоящее время повсеместно на промышленных предприятиях для доставки информации используются различные технические средства. Это позволяет говорить о том, что средства связи составляют техническую базу обслуживаемых ими систем управления.

Наряду с техническими средствами связи в современных условиях применяются и нетехнические способы доставки информации — устная речь при непосредственном контакте людей, курьеры, письменные документы и т. п. Однако неуклонное увеличение оснащения промышленных предприятий различными средствами связи позволяет утверждать, что доля информации, доставляемой с помощью технических средств, будет непрерывно увеличиваться. Кроме того, в ряде производственных ситуаций, а также при работе с ЭВМ доставка информации нетехническими средствами либо вообще невозможна, либо крайне неэффективна.

Помимо доставки информации между людьми, средства связи обеспечивают возможность функционирования других элементов технической базы систем управления — вычислительной техники,

систем автоматического регулирования, телесигнализации, телеизмерения и телеуправления. Это достигается либо за счет включения в состав системы связи специальных устройств, либо за счет совместного использования сети линейных сооружений промышленных предприятий.

Таким образом, средства связи являются составной частью технической базы систем управления, предназначенной для обеспечения доставки информации и осуществления действия других составных частей этой базы.

*Требования к производственной связи.* Говоря о системе связи как элементе технической базы систем управления, нужно подчеркнуть, что как техническая база в целом, так и составные ее части должны удовлетворять потребностям системы управления, которую они обслуживают, соответствовать этой системе. Так, на современных металлургических заводах нет возможности организовать связь с помощью костров, как в свое время запорожские казаки, использовавшие костры для предупреждения о нападении врагов, не смогли бы найти применения средствам связи современного металлургического завода.

Обеспечение соответствия системы управления и ее технической базы должно быть достигнуто по одному или нескольким показателям:

— объему сообщений, передаваемому в единицу времени;
— времени доставки заданного объема сообщений;
— достоверности доставляемой информации;
— экономичности передачи информации.

Объем сообщений, передаваемый в единицу времени, определяет качественный уровень системы связи. Если этот объем незначительный, могут быть использованы простейшие средства доставки информации. В противном случае должны применяться современные средства, обладающие высокой пропускной способностью.

Если для управления технологическим процессом, длящимся время $T$, требуется объем сообщений $V$, то способ доставки информации должен выбираться исходя из неравенства

$$V/T \ll c, \tag{1.12}$$

где $c$ — скорость передачи информации, определяемая по ф-ле (1.13).

Время доставки информации адресату складывается из времени составления адреса, подготовки информации, различного рода ожиданий в процессе установления соединения, времени передачи, а также времени получения информации адресатом. Для большинства реальных систем управления производством этот показатель является важнейшим. Ожидание в процессе установления соединения зависит от системы обслуживания (порядка выполнения операций с вызовом, поступившим на ее вход); а также параметров, характеризующих входящий поток требова-

ний и систему обслуживания (см. гл. 2). В общую величину затрат времени в процессе установления соединения включаются подходы к оконечным устройствам связи, размещенным по территории предприятия, и операции, технически необходимые для осуществления требуемого выбора (нажатие ключа, кнопки, набор номера и т. д.). Величина времени установления соединения является случайной, т. е. принимает различные значения при каждом конкретном вызове. Имеются определенные отличия по величине и структуре времени доставки информации для телефонной и телеграфной связи. Для последней, в частности, большой удельный вес занимает время подготовки информации и получения ее адресатом.

Время собственно передачи информации $T_{\text{п}}$ связано со скоростью передачи $c$ соотношением

$$T_{\text{п}} = V'/c, \tag{1.12'}$$

где $V'$ – объем сообщения, выраженный в буквах (фонемах и т. д.) и учитывающий включение в него адреса, служебных знаков и дополнительной информации для повышения достоверности. Следует отметить, что смысловая (основная) информация при этом не меняется. Скорость передачи информации, как известно [3], в пределе равна величине

$$c = C/H, \tag{1.13}$$

где $C$ — пропускная способность канала связи, определяемая по формуле Шеннона [153, 174]:

$$C = \Delta F \log\left(1 + \frac{P}{W}\right), \tag{1.14}$$

$\Delta F$ – полоса частот канала, Гц; $P/W$ — отношение сигнал/шум; $H$ — энтропия одной буквы (фонемы и т. д.) сообщения (см. разд. 1.4).

Связь между объемом сообщения и количеством информации может быть выражена уравнением

$$V' = CT_{\text{п}}/H. \tag{1.15}$$

Системы управления предъявляют к времени доставки информации в целом следующие требования:

— время доставки любого сообщения не должно превышать заданной величины;

— время доставки определенной группы сообщений не должно превышать заданной величины, а остальные сообщения могут быть либо переданы за это же время, либо задержаны;

— время доставки сообщений не должно превышать заданной для каждой группы величины.

В связи с тем, что на каждом промышленном предприятии информация имеет самое различное содержание и разнообразную форму, требование об обеспечении доставки объема всех сооб-

щений за определенный срок, как правило, не выдвигается. Таким образом, на каждом предприятии всегда имеется несколько (практически независимых друг от друга) групп передаваемых сообщений, отличающихся друг от друга формой и содержанием. Установление этих групп является важнейшим элементом обследования потоков информации на промышленных предприятиях.

К отдельным элементам процесса доставки информации адресату предъявляются следующие требования:

- время, затрачиваемое на подход к оконечному средству связи на исходящем конце, должно быть, по возможности, небольшим;
- пользование оконечным абонентским устройством не должно быть сложнее выполнения технологических операций, а время осуществления выбора требуемого абонента — не больше заданной величины;
- не должны превышать установленных величин: время ожидания освобождения средств связи на исходящем конце; время ожидания освобождения соединительных путей; время ожидания освобождения средства связи на входящем конце и т. д.

Нетрудно видеть, что требования, предъявляемые к отдельным элементам процесса доставки информации адресату, так же как и требования к общей величине времени доставки информации, целиком определяются спецификой и уровнем развития систем управления, которые средства связи обслуживают.

Достоверность доставляемой информации является важной ее характеристикой, и отсутствие этого показателя в определении количества информации по Шеннону является еще одним существенным недостатком данного определения. Обычно под достоверностью доставляемой информации понимается степень соответствия принятого сообщения переданному. От достоверности следует отличать истинность информации — ее соответствие объекту. Достоверность, например, такого текста: «Земля плоская и лежит на трех китах, плавающих в океане» — может оказаться больше, чем достоверность текста, в котором утверждается, что Земля есть третья планета Солнечной системы. Однако при любой достоверности, обеспечиваемой при доставке этих сообщений, их истинность будет постоянна.

В системах управления производством от истинности и достоверности во многом зависит эффективность управления. При разработке систем связи обычно считают, что необходимая истинность сообщений должна быть обеспечена вне этих систем, при выработке информации и осуществлении контроля за ходом управляемого процесса. Что касается системы доставки информации, то она должна только обеспечить требуемую достоверность. Однако оказалось, что и данная задача является не такой простой, как могло бы показаться на первый взгляд. Конечная величина фразовой разборчивости приводит к «потерям» при передаче устной речи. Как будет указано в гл. 2, при фразовой

разборчивости меньше 0,9 контакт между собеседниками уже нарушается. При передаче текстовых материалов по телеграфу с помощью трансмиттера одна неверно принятая буква встречается через каждые 100÷1000 знаков, а при работе с ЭВМ требуется достоверность порядка $10^{-6}$, т. е. один неверный знак на миллион переданных. Вследствие этого вопросы достижения необходимой достоверности доставки информации самым тщательным образом учитываются при синтезе конкретных систем производственной связи.

Экономичность доставки информации понимается двояко: с одной стороны, каждая система управления должна обслуживаться «соответствующими» средствами связи, а с другой стороны, каждая система связи должна передавать заданный объем сообщений при минимуме средств. Небольшое промышленное предприятие не может иметь в составе своей системы связи, например, спутник связи «Молния-1», так как это нецелесообразно по экономическим причинам. Невыгодно устанавливать радиостанции там, где можно применить телефоны; телефонный аппарат и линия АТС обычно дешевле, чем телефонный аппарат и линия прямой связи, и т. д. Экономичность доставки информации учитывается и при конструировании аппаратуры связи. Установлено, например, что троичная система кодирования является наиболее экономной. Несколько уступает ей двоичная система.

Обе стороны экономичности доставки информации связаны между собой. Если спутник «Молния-1» не может быть применен в составе системы производственной связи, то это должно быть выяснено при сопоставлении затрат на его изготовление и запуск с затратами на организацию других сетей связи.

*Производственная связь как система.* Являясь составной частью производства как кибернетической системы, производственная связь может сама рассматриваться как сложная система, состоящая из отдельных подсистем (рис. 1.6).

Как физическая система производственная связь представляет собой совокупность стационных, линейных, энергетических и гражданских сооружений и оконечных абонентских устройств.

Как экономическая система производственная связь является динамическим отражением в экономическом аспекте соотношения произведенных затрат (на создание системы доставки информации и поддержание ее в работоспособном состоянии) и полученных положительных результатов (вследствие своевременной передачи информации по управлению производством).

Как кибернетическая система производственная связь может быть разбита на управляющую (цех связи промышленного предприятия и т. п.) и управляемую (средства связи и люди, пользующиеся этими средствами) системы. Информация о состоянии управляемой системы вырабатывается частично автоматизированно (при наличии специальных устройств — контроль

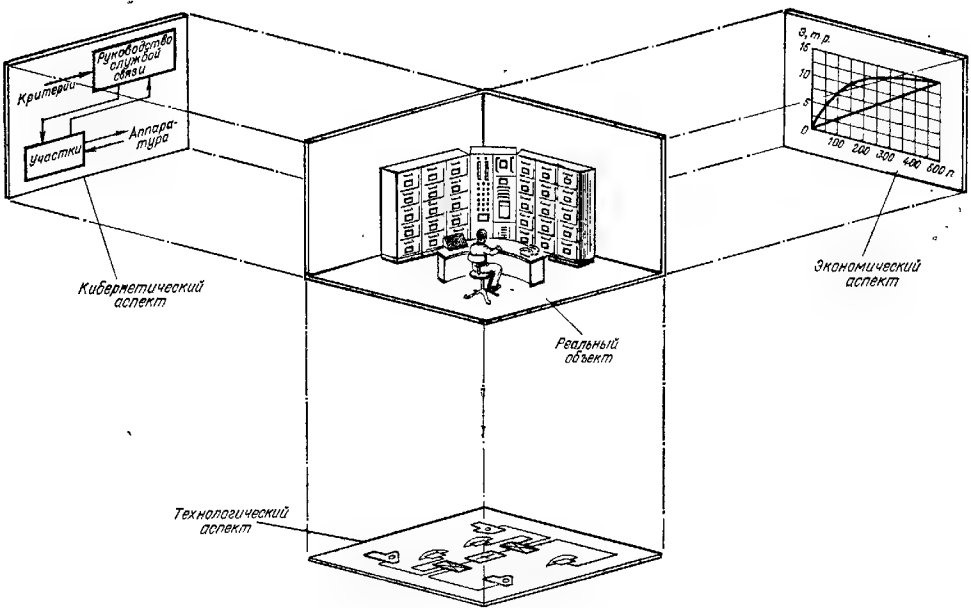



Рис. 1.6. Производственная связь как система

наличия давления в кабелях связи, исправности абонентских линий и т. д.) частично вручную — людьми (монтерами или абонентами). Доставка информации осуществляется либо с использованием самой системы связи, либо специальной системы связи (например, при наличии диспетчерской службы цеха связи на предприятии), либо нарочным при личном контакте и т. д. Обработка информации производится руководством службы связи или специальной диспетчерской службой. Используется информация ремонтными бригадами.

Как кибернетическая система производственная связь выполняет функции планирования, нормирования, управления (учет и отчетность, контроль, регулирование) и организации. Контрольные цифры для планирования работ службы связи устанавливаются вышестоящим органом, а собственно планирование осуществляется руководством службы. Управление связью (выработка, доставка, обработка и использование информации) было рассмотрено выше. Нетрудно видеть, что выработка информации соответствует фуикции учета, обработка информации — функции контроля, обработка и использование информации — функции регулирования. Организация производственной связи учитывает как структуру осуществления технологических операций доставки информации, так и структуру обеспечения обслуживания этих операций. Первая представляет собой организацию управляемой подсистемы, вторая — организацию управляющей подсистемы.

В данной книге основное внимание уделяется вопросам организации управляемой подсистемы, решаемым с позиции технико-экономического анализа и синтеза. Однако последняя глава книги посвящается и некоторым вопросам организации управляющей подсистемы.

*Уровень системы производственной связи.* Как указывалось в в разд. 1.1, существует примерно 7 уровней рассмотрения производства и каждому из них соответствует определенный уровень систем производственной связи.

На самом высшем уровне производства (народное хозяйство) системой производственной связи является общегосударственная система связи, обслуживаемая органами Министерства связи СССР. Характерной особенностью этого уровня системы производственной связи является ее междуведомственность, так как одними и теми же сооружениями связи пользуются различные министерства и ведомства. На втором и третьем уровнях производства (отрасль и подотрасль) системы производственной связи являются, как правило, комбинированными, т. е. включают в себя элементы как междуведомственной, так и ведомственной связи. При этом средства внутренней связи (диспетчерской, директорской и т. п.) являются ведомственными, а средства междугородной связи и отдельные участки городской связи — междуведомственными, т. е. находящимися на балансе и обслуживании

органов Министерства связи. Однако уже на этих уровнях систем связи некоторые ведомства (Министерство путей сообщения, Министерство газовой промышленности, Министерство энергетики и электрификации, Министерство черной металлургии, Министерство угольной промышленности и др.) имеют ведомственные системы связи, основанные на собственных или арендованных у Министерства связи СССР междугородных телефонных каналах. С другой стороны, некоторые министерства (например, строительные) полностью базируются на средствах связи Министерства связи СССР.

Начиная с четвертого уровня производства (предприятие), системы производственной связи в абсолютном большинстве случаев чисто ведомственные. Конечно, на многих промышленных предприятиях и стройках установлены телефонные аппараты от городских АТС, а также аппараты сети абонентского телеграфа, находящегося в ведении местных органов связи. Однако подавляющий объем сообщений передается (или должен передаваться) с помощью средств внутрипроизводственной связи, образующих ведомственную систему связи. Увязка общегосударственной и ведомственных сетей связи производится при проектировании по согласованию с местными органами Министерства связи.

Уровень, на котором должны разрабатываться системы производственной связи, определяется исходя из задачи обеспечения наибольшего экономического эффекта при высокой величине эффективности функционирования системы. Современные средства связи имеют большую пропускную способность, позволяют подключить широкий круг абонентов, но обладают значительной стоимостью. Вследствие этого, использование таких средств мелкими подразделениями промышленных предприятий, а также отдельными строительными организациями неэффективно, так как, с одной стороны, средства связи полностью не загружаются, а с другой стороны, большая стоимость строительства сооружений связи оказывается чувствительной для потребителей. Поскольку в составе систем связи необходимо использовать эффективные, но дорогостоящие средства, применение которых возможно только при наличии полной их загрузки, системы производственной связи должны создаваться в рамках крупных промышленных предприятий, а также строительных организаций, выполняющих весь объем строительно-монтажных работ в данном географическом пункте, имеющих собственную производственную базу, автотранспортные подразделения и управления (участки) механизации и т. д.

## 1.5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

Создание системы производственной связи не только отрасли, но и отдельного предприятия, как правило, осуществляется в течение многих лет и носит характер не единичного мероприятия,

а циклического процесса. Это объясняется тем, что система связи является технической базой системы управления производством, вследствие чего недопустимы разрывы между уровнем организации, управления и технологии производства и уровнем системы связи. Поскольку промышленное производство непрерывно развивается либо экстенсивным (за счет расширения производства, строительства новых цехов и т. д.), либо интенсивным (за счет совершенствования технологии производства) путем, непрерывно совершенствуется и система связи, постоянно приближаясь к изменившимся условиям функционирования предприятия или стройки. Исходя из этого, весь процесс создания системы производственной связи на практике разбивается на несколько очередей, причем каждая из них внедряется несколькими этапами (стадиями).

Можно выделить следующие этапы создания каждой очереди системы производственной связи: предпроектные работы, проектирование, организация внедрения, разработка и изготовление аппаратуры производственной связи, монтаж, эксплуатация (рис. 1.7). Одновременно на одном предприятии может внедряться од-

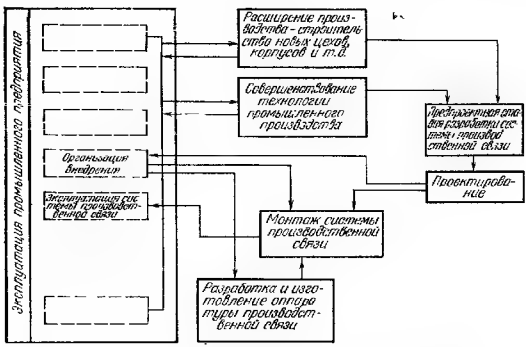

Эксплуатация промышленного предприятия
Расширение производства - строительство новых цехов, корпусов и т.д.
Совершенствование технологии промышленного производства
Предпроектная стадия разработки системы производственной связи
Организация внедрения
Проектирование
Эксплуатация системы производственной связи
Монтаж системы производственной связи
Разработка и изготовление аппаратуры производственной связи

Рис. 1.7 Схема осуществления разработки и внедрения систем производственной связи

на или более очередей, сдвинутые между собой по этапам. Например, одна очередь может находится в эксплуатации, другая — в монтаже, третья — в стадии проектирования и т. д.

*Предпроектные работы.* На предпроектной стадии определяется содержание каждой очереди, ее количественные и качественные показатели, в том числе применяемые виды связи, номенклатура и количество используемых средств, стоимость работ, численность

обслуживающего персонала. Эти работы выполняются потребителем системы производственной связи, а именно — отделами связи отраслевых и подотраслевых министерств, службами эксплуатации связи промышленных предприятий или службами главных энергетиков этих предприятий. Результаты работы на этой стадии утверждаются руководством соответствующих министерств, главков, промышленных предприятий и строек.

На практике встречаются самые разнообразные формы представления материалов предпроектных работ: генеральная схема развития системы производственной связи отрасли или подотрасли на 5—10 лет; основные положения; технико-экономические обоснования (ТЭО); технико-экономические доклады (ТЭД), и наконец, технические задания на разработку проектов строительства соответствующих объектов системы. В разработке указанных документов может принимать участие и проектная организация. К предпроектным работам относится и вся деятельность по перспективному, годовому и текущему планированию развития систем производственной связи, а также их материально-технического обеспечения. Эти работы выполняются соответствующими плановыми органами, органами материально-технического снабжения, отделами связи, службами эксплуатации систем производственной связи и т. п.

К сожалению, весь комплекс предпроектных работ выполняется в настоящее время чрезмерно субъективно из-за отсутствия каких-либо научных методов, а также из-за недостатка информации о создании и особенностях развития систем производственной связи в других отраслях, на других предприятиях, за рубежом. Указанный субъективизм приводит к появлению серьезных диспропорций между уровнем производства и уровнем производственной связи, что вызывает значительные материальные потери. Чем выше уровень руководства, на котором совершаются подобные ошибки, тем значительнее потери, так как они касаются большого количества участков, цехов, предприятий. С другой стороны, чем выше уровень руководства, тем легче собрать информацию, позволяющую вывести какие-либо усредненные показатели, которые можно принять за контрольные, а в некоторых случаях нормативные или даже директивные цифры.

В простейшем случае предпроектные работы на уровне отрасли и подотрасли могут осуществляться исходя из задач достижения либо средних цифр оснащения предприятий средствами производственной связи (например, количество телефонных аппаратов диспетчерской связи на единицу выпущенной продукции, количество радиостанций на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ, задействованная или монтированная емкость, отнесенная к 1000 трудящихся, и т. д.), либо уровня передовых предприятий, либо уровня другой отрасли, либо уровня данной отрасли какой-либо зарубежной страны. Методика получения таких показателей, оперирование ими, оценка их надежности достаточно подробно рассмотрены в разд. 6.2—6.4.

Приняв подобные показатели за основу, можно планировать количественно развитие систем производственной связи, их стоимость, материально-техническое обеспечение, кадры как в целом по отрасли, так и по отдельным предприятиям, как в целом по плановому периоду (год, пятилетие, 10-летие), так и по отдельным временным этапам. Подобное планирование, как правило, дает значительно лучшие результаты, чем экспертная оценка самого квалифицированного специалиста, но не гарантирует от появления ошибок и диспропорций, поскольку не учитывает более глубоких зависимостей, присущих системам производственной связи и описывающих их согласование с системами управления отдельными предприятиями. Поэтому более высоким уровнем развития методики планирования производственной связи является использование мощного аппарата регрессионного и корреляционного анализов, который позволяет выразить требуемые плановые показатели (емкость ПАТС, количество телефонных аппаратов, коммутаторов, радиостанций, стоимость системы и т. п.) как функции различных факторов, оказывающих на них существенное влияние. Такие факторы можно найти при рассмотрении стыкования системы производства и системы производственной связи (технология производства, мощность, число трудящихся и т. д.).

Применение регрессионного и корреляционного анализов при планировании дает возможность получить теоретически любую точность, так как число факторов может быть принято любым. На практике (см. разд. 6.5—6.7, а также гл. 5) число рассматриваемых факторов ограничивается, что, конечно, уменьшает точность, но при этом снижает и трудоемкость вычислений. Недостатком данного метода является необходимость проведения соответствующих статистических исследований и применения для расчетов ЭВМ. Правда, последнее обстоятельство из недостатка превращается в очень важное преимущество в отраслевых АСУ.

Третьим этапом на пути совершенствования методики выполнения предпроектных работ на уровне отрасли (или подотрасли) являются разработка соответствующей (как правило, конфликтной) экономико-математической модели и ее расчет методами теории игр или динамического программирования. Работы в направлении создания такой методики находятся в начальной стадии, и здесь приводятся лишь краткие сведения об этих методах, а также некоторая другая информация, которая может быть использована в указанных целях.

Во всех случаях планирование во времени должно осуществляться с использованием научного прогнозирования (см. гл. 2 и 6).

Не следует забывать, что развитие производственной связи входит в комплекс вопросов, подлежащих решению в рамках отраслевой АСУ, вычислительный центр которой должен выполнять перечисленные выше работы по планированию производственной связи в увязке с другими элементами системы. ЭВМ при этом

должна быть задана методика проведения расчетов. Чем совершеннее будет эта методика, тем меньшие убытки будет терпеть основное производство из-за недостатка средств передачи информации.

Предпроектные работы на уровне промышленного предприятия или строительной организации сложнее построить на базе регрессионного и корреляционного анализов, так как объем статистической информации, как правило, в этих случаях является недостаточным. Планирование здесь может осуществляться по точечным показателям (в сравнении с аналогичными передовыми показателями по отрасли, другим предприятиям и т. п.) на основе методики, изложенной в разд. 6.2—6.4. Представляется перспективным использование на этом уровне экономико-математических конфликтных моделей и их расчет на ЭВМ.

Наиболее просто планируется развитие средств производственной связи на уровне цеха, участка, рабочего места. Критерием оптимальности на данных уровнях является быстрейшая ликвидация несоответствия между потребностями технологических процессов (производственных и управленческих) и недостатком количества средств доставки информации или недостаточной эффективностью функционирования этих средств.

Указанный критерий оптимальности не сохраняется на других уровнях, где имеющиеся средства распределяются по описанным выше методам (например, исходя из обеспечения среднего показателя по отрасли и т. д.). Однако при отсутствии дефицита требуемых средств плановые показатели, рассчитанные исходя из этого критерия, могут быть удовлетворены и на других, более высоких уровнях.

*Проектные работы.* В соответствии с действующим положением (СН-202-69) системы производственной связи должны проектироваться либо двухстадийно (технический проект и рабочие чертежи) либо одностадийно (техно-рабочий проект) в зависимости от сложности строящегося объекта, его сметной стоимости и степени использования типовых чертежей.

В комплексы проектных работ входят технико-экономические расчеты (выбор вариантов организации связи, типа оборудования, определение емкостей станций сети, количество абонентских пунктов и т. д.), технологическая часть (монтажные и конструктивные чертежи, планы размещения оборудования и т. д.), энергетическая часть, гражданские сооружения, сметная часть. В данной книге рассматривается ряд вопросов технико-экономического проектирования (гл. 3, 4, 5, 7, 8), которые в настоящее время из-за отсутствия методики либо вообще не рассматриваются проектировщиками, либо в каждом конкретном случае решаются субъективно. В последнем случае на одно удачное решение приходится значительное количество неудачных, которые приводят к возникновению «узких мест» в системе связи еще до того, как она создана.

При проектировании систем производственной связи в основном рассчитывают: число приборов и соединительных линий на

АТС; тип аккумуляторных батарей; количество и мощность выпрямительных устройств; высоту подъема мачты для размещения антенн укв радиостанций, диаметр токоведущей жилы кабельных линий при заданной величине затухания или величину затухания при заданном диаметре жил; диаграмму уровней при применении аппаратуры высокочастотного уплотнения; параметры влияния линий сильного тока и электрифицированных железных дорог на кабели связи и некоторые другие величины. Методики подобных расчетов достаточно подробно рассмотрены в [7, 40—42, 61, 64, 89, 96, 97 и др.].

Технико-экономические расчеты, подкрепляющие целесообразность принятых решений по районированию ПАТС, их узлообразованию, а также размещению шкафов и других распределительных устройств, при проектировании систем производственной связи выполняются крайне редко, хотя описания методики данных расчетов имеются в литературе [54, 96 и др.]. Причиной такого положения являются как недостатки этих методик (в частности, серьезные ограничения в исходных посылках), так и значительные вычислительные сложности при пользовании ими. Совсем не производятся при проектировании систем производственной связи расчеты: количества абонентов, которые могут пользоваться одним оконечным устройством передачи информации; числа оконечных устройств (телефонных аппаратов, радиостанций и пр.), включение которых допустимо в одну сеть; оптимального типа применяемого оборудования; целесообразности использования той или иной схемы организации связи и других задач, которые требуют для своего решения знания параметров входящего потока (см. разд. 3.2), специальной методики и значительных вычислительных сложностей. Эти вопросы в литературе отражения не нашли, но если вникнуть в них более внимательно, то окажется, что именно они отражают существо производственной связи, так как их решение тесным образом связано с увязкой системы производства и системы производственной связи.

В перспективе ожидается автоматизация проектных работ. Уже сейчас наличие солидной нормативной базы позволяет полностью автоматизировать процесс составления смет, спецификаций, ведомостей, разработку (а точнее выборку) большого количества типовых монтажных и конструктивных чертежей (схемы станционных соединений, кабельные планы, установочные чертежи, подпольные желоба, кабель-росты и т. п.), а также типовых чертежей энергетической части проекта и гражданских сооружений.

*Организация внедрения систем производственной связи.* Орган или служба, которые выполняют предпроектные работы, как правило, осуществляют управление ходом работ по вводу какой-либо очереди системы производственной связи в эксплуатацию. Прежде всего заключается договор либо с институтом — генеральным проектировщиком данного производства, либо со специализированной проектной организацией. Затем рассматриваются и утверждают-

ся проектные документы, открывается финансирование, заказываются в установленном порядке оборудование и кабельная продукция, обеспечивается их хранение; заключается договор с генподрядной строительной организацией или (при отсутствии общестроительных работ) непосредственно со специализированной монтажной организацией; учитывается, контролируется и регулируется ход монтажных работ; контролируется ввод объектов в эксплуатацию. Все перечисленные работы в настоящее время выполняются людьми, с огромным трудом поддаются формализации и в ближайшей перспективе трудно ожидать передачу решения этих вопросов в ведение ЭВМ.

*Разработка и изготовление аппаратуры.* Разработкой и изготовлением аппаратуры радиоэлектроники и связи и, в частности, аппаратуры производственной связи занимается в основном одна отрасль народного хозяйства — радиопромышленность.

Некоторые устройства производственной связи изготавливаются предприятиями Министерства связи, Министерства путей сообщений и других ведомств. Поставка этих устройств предприятиям и стройкам осуществляется по их ежегодным заявкам органами Главснаба.

*Монтаж.* Устройства производственной связи, как правило, монтируются организациями Министерства монтажных и специальных работ СССР и Министерства связи по инструкциям, утвержденным этими министерствами. В некоторых случаях монтаж выполняется силами служб эксплуатации промышленных предприятий и строек.

Функции учета, контроля, регулирования монтажных работ, а также их планирования, организации и нормирования в перспективе будут автоматизированы в рамках отраслевой АСУ строительства.

*Эксплуатация.* Устройства производственной связи вследствие их недостаточной надежности требуют постоянного обслуживания. С этой целью на промышленных предприятиях и стройках создаются специальные эксплуатационные подразделения. Как правило, уровень специализации служб эксплуатации, их численность, периодичность профилактического обслуживания, организация ремонта и другие вопросы определяются на основе действующих ведомственных нормативных документов, составленных применительно к определенным условиям и не учитывающих (или недостаточно учитывающих) их разнообразие на практике. Между тем такие математические методы есть. В гл. 9 показано, как с помощью этих методов решаются некоторые задачи организации эксплуатации систем производственной связи. Несомненно, что применение ЭВМ для решения подобных задач может коренным образом преобразить существующие организационные формы обслуживания средств производственной связи, сделать службы эксплуатации промышленных предприятий и строек эффективными.

# ГЛАВА ВТОРАЯ

## *Краткие сведения о математическом аппарате проектирования систем производственной связи*

### 2.1. ТЕОРИЯ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

*Предмет, цель и задача теории.* Теория массового обслуживания является основой для расчета систем связи. Предметом теории является количественное описание процессов, получивших название «массовое обслуживание». Указанные процессы протекают в сфере коммунальных, торговых, транспортных и т. п. услуг (мастерские по ремонту бытовых приборов, магазины, бани, кассы, городской транспорт и т. д.), что и обусловило название этих процессов, а через них и всей теории. К ним могут быть отнесены и такие процессы, которые, на первый взгляд, не имеют ничего общего с процессами обслуживания, — размещение точек противоракетной обороны, выбор способа проведения ремонта машин, определение числа резервных элементов сложного технического устройства и т. д. Тем не менее все эти процессы и задачи имеют одинаковую математическую модель и описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями.

Современная математическая наука под массовыми процессами или явлениями понимает такие, которые имеют место в совокупностях большого числа равноправных или почти равноправных объектов и определяются именно этим массовым характером явления и лишь в незначительной мере зависят от природы составляющих объектов [36].

Массовые процессы или явления неизбежны в любой иерархически организованной системе. На каждом уровне таких систем связь между подсистемами необходимо рассматривать независимо от внутренней структуры каждой подсистемы. Это означает, что закономерности развития внешних связей между подсистемами отличны от закономерностей внутреннего развития каждой подсистемы в отдельности. Подобные статистические закономерности наблюдаются всегда, когда мы имеем дело с массой однородных случайных явлений. Закономерности, проявляющиеся в этой массе, оказываются практически независимыми от индивидуальных особенностей отдельных случайных явлений, входящих в массу [28].

Математическая модель процесса массового обслуживания может быть описана следующим образом: на вход некоторого устройства, которое можно назвать обслуживающим, поступает поток требований (вызовов, заявок и т. д.), носящий, как правило, случайный характер. Каждое из этих требований находится в обслуживающем устройстве также, как правило, случайное время (до окончания процесса обслуживания).

Несмотря на то, что такая модель кажется весьма простой, существует большое количество ее разновидностей. Это объясняется тем, что каждое обслуживающее устройство состоит из определенного количества обслуживателей (обслуживающих аппаратов). Например, АТС (обслуживающее устройство) содержит в себе сотни, а иногда и тысячи коммутационных приборов (обслуживающие аппараты). Если в определенный момент времени число поступивших требований превысит число обслуживателей, то обслуживание «избыточной» части требований будет задержано (системы с ожиданием) или вообще сорвано (системы с потерями). В системах с ожиданием задерживаемое требование может быть либо поставлено на ожидание, сколько бы на это не потребовалось времени, либо, в зависимости от длины очереди, поставлено на ожидание (если очередь короткая) или получить отказ в обслуживании (если очередь длинная), либо поставлено на ожидание до какого-то определенного момента времени, а затем (если к этому моменту оно будет еще необслуженным) исключено из очереди.

Процессы обслуживания отличаются и по организации обслуживающего устройства: его структуре, дисциплине обслуживания.

По структуре различают однофазовые и многофазовые обслуживающие устройства. Если требование обслуживается только одним обслуживателем, то обслуживающее устройство однофазовое. Примером такого устройства является сеть диспетчерской связи, когда один разговор — требование — осуществляется одним обслуживателем, состоящим из телефонного аппарата, линии и соответствующего абонентского комплекта коммутатора диспетчера.

В том случае, когда одно требование последовательно обрабатывается несколькими обслуживателями, обслуживающее устройство является многофазовым. Примером такого устройства является АТС, соединение на которой, как известно, устанавливается по ступеням искания.

Требования, поступающие на вход обслуживающего устройства, могут обслуживаться в порядке очереди; в случайном порядке; с преимуществом для требований определенного вида (обслуживание с приоритетом) и другими разнообразными способами.

Расчеты характеристик массового обслуживания упрощаются, если систему, вырабатывающую требования для обслуживающего устройства, можно считать состоящей из бесконечного числа источников. Если такое допущение невозможно, то следует установить конечное число этих источников, так как тогда необходимо будет учитывать не только состояние (количество занятых обслуживаю-

щих аппаратов) обслуживающего устройства, но и состояния источников возникновения требований. Реально ни одна система не может иметь бесконечного числа источников. Однако, когда число этих источников очень велико (больше 40÷100), можно считать, что число их не ограничено. Такое допущение возможно вследствие того, что степень точности вычислений в данном случае будет удовлетворительной для решения практически любых задач и возрастет с увеличением числа источников требований. В других задачах число требований, одновременно поступающих на вход обслуживающего устройства, принципиально не может быть больше определенного числа. Например, число поступивших одновременно требований в радиосети не может превышать числа радиостанций.

Имеет принципиальное значение и структура обслуживающего устройства. Задачи массового обслуживания решаются по-разному в случаях, когда в обслуживающем устройстве содержится бесконечное количество обслуживателей и когда количество сугубо ограничено. Реально неограниченного числа обслуживателей ни в одном устройстве быть не может. Однако, если число обслуживателей в устройстве достаточно велико, то можно принять указанное допущение. Это позволяет значительно упростить решение задач, связанных с такими устройствами.

Если каждое поступившее требование может быть принято к обслуживанию любым из свободных в данный момент обслуживателей, то устройство, содержащее эти аппараты, называется неупорядоченным. Примером такого устройства может быть совокупность средств связи цеха, содержащая несколько телефонных аппаратов. В упорядоченных устройствах аппараты, как правило, пронумерованы и новое требование обслуживается только первым аппаратом, если он свободен, или вторым, если первый занят, или третьим, если заняты первый и второй и т. д. Примером упорядоченного устройства является горизонтальное поле декадно-шагового искателя автоматической телефонной станции, который осуществляет свободное (вращательное) движение. В некоторых упорядоченных устройствах аппараты загружаются в порядке очереди, т. е. освободившийся обслуживатель становится в очередь и не загружается до тех пор, пока не получат работу все аппараты, освободившиеся ранее него. Возможны и другие способы упорядочения устройств.

В практических условиях регулировать количество поступающих в обслуживающее устройство требований в течение заданного отрезка времени весьма затруднительно или даже невозможно. Это объясняется тем, что обслуживающее устройство, как видно из названия процессов и теории, является частью системы, создающей для него поток требований (система связи по отношению к системе управления; сфера бытовых, коммунальных и прочих услуг — по отношению к данному человеческому обществу и т. д.). Указанный поток требований обычно (но не обязательно) является случайным (см. ниже). Однако всегда имеется возможность ре-

гулировать организацию обслуживания поступивших требований — увеличивать или уменьшать число обслуживателей, распределять поступающие требования между ними, группировать эти аппараты таким образом, чтобы обеспечивалось требуемое качество функционирования обслуживающего устройства. Последнее определяется в зависимости от назначения обслуживающего устройства либо показателями, характеризующими стоимость устройства и использование его обслуживающих аппаратов, либо показателями, характеризующими процесс прохождения требования через устройство (время ожидания, длина очереди, вероятность отказа) либо теми и другими вместе.

Теперь становится очевидной цель теории массового обслуживания — она состоит в разработке математических методов определения основных характеристик процессов массового обслуживания для оценки качества функционирования обслуживающего устройства. Задачей этой теории является отыскание функциональных зависимостей величин, характеризующих качество функционирования обслуживающего устройства, от характеристик входящего потока и параметров, характеризующих пропускную способность одного обслуживающего аппарата, а также организации обслуживания в целом.

Таким образом, предмет, цель и задача теории массового обслуживания базируются на фундаментальных понятиях «случайная величина», «вероятность», «распределение вероятностей», вводимых теорией вероятностей. Представляется, что содержание этих понятий читателю известно.

*Входящий поток и время обслуживания.* Моменты возникновения заявок на обслуживание на входе сети связи определяются периодичностью представления информации. В случае детерминированного процесса моменты $t_1$, $t_2$, $t_3$, ..., $t_n$ возникновения заявок наперед известны. Однако, как указывалось выше, периодичность поступления информации в большинстве случаев является величиной случайной и весь процесс поступления информации — случайным процессом.

При наблюдении за поступлением вызовов (требований, заявок) на вход сети связи каждый раз фиксируется только определенная реализация данного процесса. Если контролировать поступление вызовов в течение определенного отрезка времени несколько раз, то каждый раз будут получены различные его реализации. При этом под реализацией процесса понимается конкретная запись моментов поступления в систему вызовов. Для полного описания случайного процесса невозможно определить все его реализации, так как их будет бесконечное множество. В этих целях используются вероятностные характеристики. Как известно из теории вероятностей, наиболее полную характеристику случайного процесса дают законы распределения случайных величин, определяющих данный процесс. Напомним, что законом распределения случайной величины называется такой способ задания ее поведе-

ния, который позволяет по определенным правилам получить из него функцию распределения. Функцией распределения вероятностей случайной величины $\xi$ называется вероятность того, что $\xi$ примет значение меньше, чем $x$:

$$F_{\xi}(x) = P(\xi < x). \tag{2.1}$$

Случайная величина $\xi$ может принимать непрерывные (т. е. любые) или только дискретные (например, целочисленные) значения.

Плотностью распределения непрерывной случайной величины $\xi$ называют функцию $f_{\xi}$, для которой при всех значениях $x$ выполнено равенство.

$$F_{\xi}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{\xi}(z)\,dz. \tag{2.2}$$

При рассмотрении входящего в сеть связи потока требований (заявок, вызовов) случайными величинами являются моменты возникновения отдельных «заявок на обслуживание» (вызовов, требований и т. д.), объемы документированных сообщений, поступающих в единицу времени, количество вызовов (для недокументированной информации) в единицу времени. Случайной величиной является также и время обслуживания одного вызова, представляющее собой, как указывалось выше, характеристику не входящего потока требований, а обслуживающего устройства (в данном случае сети связи).

Знание закона распределения позволяет однозначно установить все необходимые вероятностные характеристики случайного процесса и прогнозировать нагрузку, поступающую на вход сети в заданный отрезок времени. Принципиально входящий поток требований и время обслуживания одного требования могут подчиняться любому закону распределения: дискретному, если в качестве случайной величины рассматривается количество вызовов, или непрерывному, если в качестве случайной величины рассматривается продолжительность вызова. В табл. 2.1 приведены основные данные некоторых распределений вероятностей, наиболее часто встречающихся на практике [35, 70].

Для дискретных случайных процессов очень важное значение имеют свойства наличия или отсутствия стационарности, последействия и ординарности.

Стационарность означает, что для любой группы из конечного числа непересекающихся промежутков времени вероятность поступления определенного числа событий на протяжении каждого из них зависит от числа этих событий и от длительности промежутков времени, но не изменяется от сдвига всех временных отрезков на одну и ту же величину. В частности, вероятность появления $n$ событий в течение промежутка времени от $T$ до $T+t$ не зависит от $T$ и является функцией только $n$ и $t$.

Таблица 2.1

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

| Распределения вероятностей | | Возможные значения для дискретных распределений. Область значений для непрерывных распределений | Расчетные формулы | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | вероятности | плотности непрерывного распределения | математического ожидания | дисперсии |
| Дискретные | Биномиальные | $0, 1, 2, \ldots, m$ | $P_m(n) = C_m^n p^{n(m-n)} (1-p)$ | — | $mp$ | $mp(1-p)$ |
| | Пуассона | $0, 1, 2, \ldots$ | $P_n = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$ | — | $\lambda$ | $\lambda$ |
| | Геометрическое | $0, 1, 2 \ldots$ | $P_n = p(1-p)^{n-1}$ | — | $1/p$ | $(1-p)/p^2$ |
| | Равномерное | $a, b$ | $F(t) = (t-a)/(b-a)$ | $1/(b-a)$ | $(a+b)/2$ | $(b-a)^2/12$ |
| Непрерывные | Нормальное | $-\infty, \infty$ | $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt$ | $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}$ | $\bar{t}$ | $\sigma^2$ |
| | Логарифмически-нормальное | $0, \infty$ | $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{t} e^{-\frac{(\log t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{t} dt$ | $\frac{1}{t\,\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}$ | $e^{\bar{t}+\frac{\sigma^2}{2}}$ | $e^{2\bar{t}+\sigma^2}\left(e^{\sigma^2}-1\right)$ |
| | Вейбулл | $0, \infty$ | $F(t) = 1 - e^{-ct^\alpha}$ | $\alpha c t^{\alpha-1} e^{-ct^\alpha}$ | $\frac{\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)}{c^{1/\alpha}}$ | $\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{\alpha}\right)+\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)}{c^{2/\alpha}}$ |
| | Показательное | $0, \infty$ | $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ | $\lambda e^{-\lambda t}$ | $1/\lambda$ | $1/\lambda^2$ |

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: $m$ — максимально возможные значения случайной величины; $n$ — число независимых испытаний; $p$ — вероятность появления случайного события, способного принять одно из возможных значений 0, 1, 2, ..., $m$; $\lambda$ — интенсивность потока, представляющая собой количество вызовов в единицу времени; $t$ — случайная величина продолжительности одного вызова (разговора, передачи телеграммы и т. п.); $t$ — математическое ожидание продолжительности вызова или обслуживания; $a$, $b$ — границы области значений функции распределения вероятностей; $\sigma$ — среднее квадратическое отклонение; $c$, $\alpha$ — константы; $\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)$, $\Gamma\left(1+\frac{2}{\alpha}\right)$ — гамма-функции. Как известно $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$.

Отсутствие последействия означает, что вероятность поступления $k$ событий в течение промежутка времени от $T$ до $T+t$ не зависит от того, сколько раз и как появлялись события ранее. Отсутствие последействия означает взаимную независимость появления того или иного числа событий в непересекающиеся промежутки времени. Если за сколь угодно малый промежуток времени вероятность одновременного появления двух или нескольких событий бесконечно мала, то процесс, обладающий таким свойством, называется ординарным.

Входящий поток требований, обладающий стационарностью, ординарностью и отсутствием последействия, называется простейшим (или пуассоновским). Для такого потока вероятность появления $n$ вызовов за время $t$ определяется, как видно из табл. 2.1, по формуле

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}. \qquad (2.3)$$

Простейший поток обладает рядом интересных свойств:

а) для полного описания простейшего потока достаточно знать математическое ожидание числа требований, поступивших за единицу времени, которое численно равно интенсивности входящего потока;

б) конкретные реализации входящего потока могут значительно отличаться друг от друга, поскольку дисперсия равна математическому ожиданию;

в) вероятность получения в течение промежутка времени длительности $t$ ровно $n$ требований достигает наибольшего значения для $t=n/\lambda$ $(n=0, 1, 2\ldots)$;

г) вероятность поступления $n$ вызовов, как видно из ф-лы (2.3), определяется произведением интенсивности потока на продолжительность вызова, т. е. ф-ла (2.3) может быть представлена следующим образом:

$$P_n(t) = \frac{y^n}{n!} e^{-y}, \qquad (2.3')$$

где $y=\lambda t$ — величина телефонной нагрузки.

Вероятность $P_n(t)$ может рассматриваться и как вероятность одновременного занятия $n$ обслуживающих аппаратов, через которые проходит $\lambda$ требований со средней продолжительностью $t$ каждое, и как вероятность появления $n$ требований за время $t$, равное средней продолжительности обслуживания одного требования. Если входящий поток простейший, то указанные его свойства позволяют весьма просто решать задачи массового обслуживания. Во многих случаях, связанных с потоками вызовов в различных сетях связи, гипотеза о простейшем потоке является хорошим приближением к реальному положению дел. Конкретные примеры простейших потоков в сетях производственной связи будут рассмотрены в разд. 3.2. В дальнейшем для упрощения выкладок полагается, что это положение сохраняется всегда. Однако следует учитывать, что

на самом деле простейший поток может лишь приблизительно описывать входящие потоки конкретных сетей и для более точного их описания требуется использовать иные распределения, причем не обязательно из числа тех, которые приведены в табл. 2.1.

Из ф-лы (2.3) следует, что если входящий поток требований простейший, то вероятность $q(t)$ того, что вызова за время $t$ не будет, подчиняется экспоненциальному закону, так как при $n=0$

$$P_0(t) = q(t) = e^{-\lambda t}. \tag{2.4}$$

Обобщением простейшего потока является стационарный ординарный поток с ограниченным последействием. Потоком с ограниченным последействием называется такой, для которого промежутки времени между смежными требованиями есть последовательность взаимно независимых величин. Если для полного определения простейшего потока достаточно задание одной постоянной величины — интенсивности, то для определения стационарного ординарного потока с ограниченным последействием достаточно задание одной функции $\varphi_0(t)$, представляющей собой предел условной вероятности отсутствия требований за время $t$ при условии, что за промежуток времени $\tau$ поступило хотя бы одно требование. При этом $\tau$ есть предшествующий $t$ и смежный с ним промежуток времени.

Таким образом,

$$\varphi_0(t) = \lim_{\tau \to 0} \frac{P(\tau,\ t)}{P(\tau)}, \tag{2.5}$$

где $P(\tau)$ — вероятность поступления, по крайней мере, одного требования за время $\tau$; $P(\tau,\ t)$ — вероятность отсутствия требований за время $t$ при условии, что за предшествующий отрезок времени $\tau$ поступило хотя бы одно требование. Функция $\varphi_0(t)$ носит название функции Пальма. Установлено, что для стационарного ординарного потока с ограниченным последействием вероятность того, что момент поступления $n$-го вызова меньше $t$, равна

$$P_n(t) = 1 - \varphi_0(t), \tag{2.6}$$

где $P_n(t)$ — вероятность того, что момент поступления $n$-го вызова меньше $t_\xi$. Формула (2.6) справедлива при любом $n \geqslant 2$, т. е. $P_2(t) = P_3(t) = \ldots = P_n(t)$. Заметим, что для стационарного ординарного потока с ограниченным последействием интенсивность потока $\lambda$ не равна математическому ожиданию числа требований за единицу времени, как это имело место для простейшего потока. В этом случае

$$\lambda = \lim_{\tau \to 0} \frac{P(\tau)}{\tau}. \tag{2.7}$$

Интенсивность такого потока может быть определена и как

$$\lambda = \frac{P_1(t)}{\int_0^t \varphi_0(x)\,dx}, \qquad (2.7')$$

где $\varphi_0(x)$ — функция Пальма.

Функция Пальма широко применяется при расчете многофазовых систем связи, поскольку доказано [171], что если на вход многофазового обслуживающего устройства поступает простейший поток требований, то на все обслуживающие аппараты этого устройства, кроме первого, будет поступать стационарный ординарный поток с ограниченным последействием.

Другое обобщение простейшего потока может быть получено, если связать последействие с числом обслуживаемых одновременно вызовов. Потоком с простым последействием называется ординарный поток вызовов, для которого в любой момент времени $T$ существует конечный условный параметр этого потока, зависящий только от состояния системы обслуживания в момент $T$ и характеристики вызова. Вероятности состояний системы зависят от $T$ и вероятности поступления вызовов в промежутке $T+\Delta t$, т. е. поток с простым последействием является нестационарным потоком. Поток с простым последействием не может быть задан отдельно от системы обслуживания. Задание же системы и стратегии обслуживания, а также функций распределения времени занятия полностью определяет данный поток. Поток с простым последействием, параметр которого зависит только от числа обслуживаемых в данный момент вызовов, называется симметричным. Простейший поток это частный случай потока с простым последствием, в том числе симметричного, когда параметр не зависит от состояния системы.

Симметричный поток называется примитивным, если его параметр $\lambda_i$ прямо пропорционален числу независимых и свободных в данный момент источников, т. е. $\lambda_i=(n-i)\alpha$, где $\alpha$ — число, представляющее коэффициент пропорциональности, равный параметру потока одного источника в момент, когда последний свободен; $n$— общее число источников; $i$ - число занятых источников (занятый источник не может производить вызовы) [83].

Если на полнодоступный пучок с $v$ линиями поступает симметричный примитивный поток вызовов от $n$ источников, то вероятность наличия $i$ занятых линий определяется ф-лой Энгсета [83]

$$P_i = \frac{C_n^i \left(\frac{\lambda}{n}\right)^i \left(1-\frac{\lambda}{n}\right)^{n-i}}{\sum_{i=0}^{v} C_n^i \left(\frac{\lambda}{n}\right)^i \left(1-\frac{\lambda}{n}\right)^{n-i}},$$

где $\lambda = n\frac{\alpha}{1+\alpha}$.

Потери по времени $P_t$ численно равны вероятности занятости всех линий:

$$P_t = P_v = \frac{C_n^v \left( \frac{\frac{\lambda}{n}}{1 - \frac{\lambda}{n}} \right)^v}{\sum_{i=0}^{v} C_n^i \left( \frac{\frac{\lambda}{n}}{1 - \frac{\lambda}{n}} \right)^i}.$$

Потери по вызовам могут быть представлены в виде

$$P_в = \frac{C_{n-1}^v \alpha^v}{\sum_{i=0}^{v} C_{n-1}^i \alpha^i}.$$

Можно убедиться в том, что при $n \to \infty$ последняя формула переходит в формулу Эрланга.

Время обслуживания требования определяется, с одной стороны, пропускной способностью обслуживающего аппарата, а с другой стороны, продолжительностью поступившего требования. Это время является случайным, поскольку случайными являются продолжительности вызовов (длительность разговоров, число слов в телеграмме и т. д.) и пропускная способность обслуживающих аппаратов (время установления соединения телефонисткой и т. п.).

Если при рассмотрении входящего потока требований основное внимание уделяется интенсивности потока, являющейся дискретной случайной величиной, то время обслуживания обычно считается непрерывной случайной величиной. Дискретный пуассоновский процесс характеризуется только функцией распределения вида

$$F_k(x) = \sum_{k=0}^{x} P_k(t) = \sum_{k=0}^{x} \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

представляющей собой «лестницу» с бесконечным множеством «ступенек», начинающихся в неотрицательных целочисленных абсциссах. Поэтому можно говорить не только о функции распределения вероятностей случайной величины времени обслуживания вида (2.1), но и о ее плотности вида (2.2). Как в теоретических исследованиях, так и на практике, часто применяется показательный закон распределения этой случайной величины. Интенсивность $\lambda$, как следует из табл. 2.1, в данном случае представляет собой обратную величину математического ожидания времени обслужива-

Таблица 2.2

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЗАДАЧ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
(ВХОДЯЩИЙ ПОТОК — ПУАССОНОВСКИЙ, ВРЕМЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ — ПОКАЗАТЕЛЬНОЕ)

| Сети связи | Характеристика сети | | | Вероятность одновременного поступления $k$ вызовов при условии | | Вероятность того, что все обслуживающие аппараты свободны, $p_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | число обслуживателей | число источников требований | максимальная длина очереди | $1 < k < v$ | $v < k < m$ | |
| Без потерь и ожидания | неогр. | неогр. | — | $p_k = \frac{y^k}{k!}\, e^{-y}$ | | $p_0 = e^{-y}$ |
| С потерями | $v$ | неогр. | — | $p_k = \frac{y^k}{k!}\, p_0$ | — | $p_0 = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{v} \frac{y^k}{k!}}$ |
| С ожиданием | $v$ | $m$ | неогр. | $p_k = \frac{m!\, y^k}{k!(m-k)!}\, p_0$ | $p_k = \frac{m! y^k}{v^{k-v} v!(m-k)}\, p_0$ | $p_0 = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{v} \frac{m! y^k}{(m-k)!\, k!} + \sum\limits_{k=v+1}^{m} \frac{m! y^k}{v^{k-v} v!(m-k)!}}$ |
| С ожиданием | $v$ | неогр. | неогр. | $p_k = \frac{y^k}{k!}\, p_0$ | $p_k = \frac{y^k}{v^{k-v} v!}\, p_0$ | $p_0 = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{v-1} \frac{y^k}{k!} + \frac{y^v}{v!\left(1 - \frac{y}{v}\right)}}$ |
| С ожиданием и потерями | $v$ | неогр. | $r_0$ | $p_k = \frac{y^k}{k!}\, p_0$ | $p_k = \frac{y^k}{v^{k-v} v!}\, p_0$ | $p_0 = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{v-1} \frac{y^k}{k!} + \frac{y^v \left[1 - \left(\frac{y}{v}\right)^{r_0+1}\right]}{v!\left(1 - \frac{y}{v}\right)}}$ |

*Продолжение*

| Сети связи | Математическое ожидание длины очереди $r$ | Математическое ожидание вызовов, обслуживаемых и ожидающих обслуживания, $m_r$ | Математическое ожидание числа свободных обслуживателей $v_0$ |
|---|---|---|---|
| Без потерь и ожидания | — | $m_r = y\left(1 - e^{-\frac{t}{\bar{t}}}\right)$ | — |
| С потерями | — | $m_r = \sum_{k=1}^{v} \frac{y^k}{(k-1)!} p_0$ | $v_0 = p_0 v$ |
| С ожиданием | $r = \sum_{k=v+1}^{m} \frac{(k-v)\, m!\, y^k}{v^{k-v}\, v!(m-k)!} p_0$ | $m_r = \left[\sum_{k=1}^{v} \frac{m! y^k}{(k-1)!\,(m-k)!} + \sum_{k=v+1}^{m} \frac{k m! y^k}{v^{k-v} v!(m-k)!}\right] p_0$ | $v_0 = \sum_{k=0}^{v} \frac{(v-k)\, m!}{k!(m-k)!\, y^k} p_0$ |
| С ожиданием | $r = \frac{p_v y}{v\left(1 - \frac{y}{v}\right)^2}$ | $m_r = r - \frac{v p_v}{1 - \frac{y}{v}} + p_0 \sum_{k=1}^{v-1} \frac{y^k}{(k-1)!}$ | $v_0 = \sum_{k=0}^{v-1} \frac{(v-k)\, y^k}{k!} p_0$ |
| С ожиданием и потерями | $r = \frac{p_v}{\left(1 - \frac{y}{v}\right)^2}\left[\frac{y}{v} - (r_0+1) \times \left(\frac{y}{v}\right)^{r_0+1} + r\left(\frac{y}{v}\right)^{r_0+2}\right]$ | $m_r = r + \frac{1 - \left(\frac{y}{v}\right)^{r_0+1}}{1 - \frac{y}{v}} v p_v + p_0 \sum_{k=1}^{v-1} \frac{y^k}{(k-1)!}$ | $v_0 = \sum_{k=0}^{v-1} \frac{(v-k)\, y^k}{k!} p_0$ |

ния $\bar{t}$. Поэтому функция показательного распределения может быть представлена в виде

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\bar{t}}}, \tag{2.8}$$

а плотность этого распределения

$$f(t) = \lambda e^{-\frac{t}{\bar{t}}}. \tag{2.8'}$$

Функция показательного закона распределения представляет собой плавную кривую, асимптотически стремящуюся к единице.

Примеры использования показательного закона распределения случайной величины времени обслуживания в сетях производственной связи приведены в разд. 3.2. Надо отметить, что гипотеза о показательном законе распределения данной случайной величины в сетях производственной связи достаточно хорошо согласуется с практикой при рассмотрении продолжительности телефонных разговоров, времени передачи телеграмм и т. д. Однако, как будет показано в следующем разделе, не вызывают принципиальных трудностей и задачи, когда время обслуживания подчиняется произвольному закону распределения.

*Расчетные формулы для задач массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком и показательным временем обслуживания.* Как уже указывалось выше, предположения о том, что входящий на сети связи поток вызовов является пуассоновским, а время обслуживания одного вызова подчиняется показательному закону, на практике применяются весьма часто, поскольку эти допущения довольно близко отражают реальную картину. Поэтому весьма существенно уметь количественно решать задачи массового обслуживания, исходя из данных предположений.

Рассмотрим следующую общую задачу. Пусть имеется $m$ источников нагрузки для обслуживающего устройства, содержащего $v$ обслуживателей, каждый из которых может одновременно обслуживать только один вызов. Если в момент поступления вызова имеется хоть один свободный обслуживатель, он немедленно приступает к работе. Не имеет значения, относится система к числу упорядоченных или нет. Поток вызовов подчиняется пуассоновскому закону распределения, а время обслуживания — показательному. Возможны четыре типа сетей.

1) без потерь и без ожидания: каждый вызов, поступивший в любой момент времени, немедленно будет принят к обслуживанию свободным обслуживателем, поскольку число последних не ограничено;

2) с потерями: вызов, поступивший в момент, когда все обслуживатели заняты, покидает обслуживающее устройство неудовлетворенным;

3) с ожиданием: вызов, поступивший в момент, когда имеется

хотя бы один свободный обслуживатель, немедленно поступает на обслуживание; вызов, заставший все обслуживатели занятыми, ожидает до тех пор, пока один из этих обслуживателей освободится и приступит к обслуживанию данного вызова;

4) с ожиданием и потерями: вызов, заставший все обслуживатели занятыми, ожидает в том случае, если в момент его поступления очередь была меньше $r_0$; в противном случае вызов теряется, т. е. покидает рассматриваемое устройство необслуженным.

Для каждой из указанных сетей составляются соответствующие системы дифференциальных уравнений, решение которых позволяет получить все необходимые расчетные формулы. Поскольку во всех рассматриваемых сетях принцип составления и решения дифференциальных уравнений одинаков, он может быть хорошо проиллюстрирован на примере одной конкретной задачи — определения характеристик ожидания освобождения занятого телефонного аппарата на исходящем конце (см. гл. 3). Поэтому здесь не приводятся выводы формул, которые в ряде случаев весьма трудоемки.

В табл. 2.2 приведены готовые результаты произведенных расчетов для перечисленных выше сетей. Обозначения, принятые в ней, использовались ранее или объяснены самой таблицей. Кроме содержащихся в ней показателей, характеризующих рассматриваемые сети, на практике применяются и другие показатели, но все они могут быть получены из табличных. Например, важнейшим показателем, определяющим качество обслуживания системы с потерями, является вероятность отказа очередному вызову в обслуживании. Эта вероятность может быть получена из формулы для $p_k$ путем замены $k=v$, т. е.

$$p_v = \frac{y^v}{v!} p_0. \tag{2.9}$$

Данная формула справедлива и для систем с ожиданием, но она имеет другой физический смысл: $p_v$ здесь выступает как вероятность занятия всех $v$ обслуживателей.

Математическое ожидание числа занятых обслуживателей в соответствии с определением математического ожидания равно

$$\bar{v} = \sum_{k=1}^{v} k p_k. \tag{2.10}$$

Подставляя в эту формулу значения $p_k$, взятые из табл. 2.2, можем получить интересующую нас величину для всех рассматриваемых сетей.

Если в системах с ожиданием необходимо узнать вероятность $p_x$ того, что число требований, ожидающих начала обслуживания, больше некоторого числа $x (v \leqslant x \leqslant m)$, то

$$p_x = \sum_{k=x+1}^{m} p_k = 1 - \sum_{k=0}^{x} p_k. \tag{2.11}$$

Вероятность $p_{r_0}$ того, что все обслуживающие аппараты в системах с ожиданием в момент поступления очередного вызова заняты, может быть определена по формуле:

$$p_{r_0} = \sum_{k=v}^{v+r_0} p_k. \qquad (2.12)$$

Все обслуживающие аппараты могут быть заняты, когда очередь отсутствует совсем (число вызовов не превышает числа аппаратов), когда в очереди находится один вызов, два вызова и т. д. Следовательно, возможно $r_0+1$ состояний, когда вновь поступивший вызов застанет все обслуживающие аппараты занятыми. Так как каждое из этих состояний является несовместным событием, то по теореме сложений вероятностей получаем (2.12). Например, для системы с неограниченным ожиданием $r_0=\infty$. Выбирая выражения для $p_k$ из табл. 2.2, получим

$$p_{r_0} = \sum_{k=v}^{\infty} p_k = \sum_{k=v}^{\infty} \frac{y^k}{v^{k-v} v!} p_0.$$

После простейших преобразований окончательно имеем:

$$p_{r_0} = \frac{p_v}{1-y/v}. \qquad (2.12')$$

Для сетей с ожиданием и потерями при указанных выше условиях аналогичным образом найдем

$$p_{r_0} = \frac{p_v\left[1-\left(\frac{y}{v}\right)^{r_0+1}\right]}{1-\frac{y}{v}}. \qquad (2.12'')$$

От длины очереди зависит время $t_{r_0}$ ожидания начала обслуживания поступившего вызова, заставшего все обслуживатели занятыми. Это время является случайной величиной и может быть описано соответствующим законом распределения. Вероятность того, что время начала обслуживания вызова $t_{r_0}$ меньше $t$ для системы с неограниченным числом требований, равна

$$P(t_{r_0} < t) = 1 - p_{r_0} e^{-\left(1-\frac{y}{v}\right)v\frac{t}{\bar{t}}}, \qquad (2.13)$$

где $\bar{t}$ — среднее время обслуживания вызова.

Математическое ожидание времени начала обслуживания может быть определено исходя из очевидного равенства, справедливого для всех систем с ожиданием:

$$r = \lambda t_{r_0}. \qquad (2.14)$$

Отсюда $t_{r_0} = r/\lambda$.

Таким образом, аппарат теории массового обслуживания позволяет определить все временные и вероятностные характеристики в задачах, где входящий поток вызовов пуассоновский, а время обслуживания — показательное. Если эти условия не выполняются, то расчетные формулы значительно усложняются и вычисления по ним без применения ЭВМ практически невозможны.

## 2.2. ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Теория надежности является общей научной дисциплиной, изучающей общие методы и приемы, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, приемке и эксплуатации изделий для обеспечения максимальной их эффективности в процессе использования, а также разрабатывающей общие методы расчета качества устройств по известным качествам составляющих их частей [3,35]. В это определение входит ряд понятий, нуждающихся в уточнениях:

изделие - элемент, система или ее часть;

эксплуатация — совокупность всех фаз существования изделия: транспортировка, хранение, подготовка к использованию по назначению, обслуживание, ремонт;

качество — совокупность свойств, определяющих степень пригодности изделия для использования по назначению. При таком определении [35] понятие о качестве изделия зависит от способа использования изделия.

Теория надежности возникла в последние годы вследствие бурного развития техники, резко усложнившей функции отдельных устройств и повысившей их ответственность за выполнение этих функций. Все увеличивающаяся сложность технических устройств приводит к снижению их надежности. Разрешение указанного противоречия требует научного подхода, базирующегося на применении методов теории вероятностей, математической статистики, теории информации, теории массового обслуживания и т. п. Теория надежности в основном имеет дело со случайными процессами, поскольку как не стремятся к сохранению постоянства условий в процессе производства, однородности исходных материалов и неизменности технологии изготовления, неизбежные колебания всех этих компонентов приводят к существенному разбросу свойств готовых изделий. Кроме того, эти изделия в процессе эксплуатации находятся под воздействием случайных внешних факторов.

Многие задачи теории массового обслуживания приводят к моделям, тождественным моделям теории надежности. В ряде случаев для использования результатов более «старой» теории массового обслуживания в теории надежности достаточно слова «требование», «вызов» заменить словом «отказ», а длительность разговора, обслуживания — временем ремонта и т. п.

Понятие надежности изделия раскрывается совокупностью трех понятий — безотказности, долговечности, ремонтопригодности.

Безотказность — способность изделия сохранять работоспособность в течение определенного интервала времени в определенных условиях эксплуатации.

Долговечность — способность изделия к длительной эксплуатации при необходимом техническом обслуживании; она характеризуется либо временем, либо числом циклов, либо объемом произведенной работы.

Ремонтопригодность — приспособленность изделия к предупреждению, обнаруживанию и устранению отказов; она характеризуется затратами труда, времени и средств на ремонтные работы. При этом отказом называется частичная или полная утрата (или видоизменение) таких свойств изделий, которые существенным образом снижают работоспособность или приводят к ее полной потере.

Под надежностью системы или ее элемента подразумевается свойство сохранять свои параметры в заданных пределах и в заданных условиях эксплуатации. Системы (элементы) подразделяются на восстанавливаемые (возвращающие свои свойства после отказа в работе) и невосстанавливаемые (работающие до первого отказа).

Может рассматриваться надежность как отдельных технических устройств (например, аппаратуры связи), так и всего тракта доставки информации, состоящего из целого комплекса устройств, соединенных особым образом для осуществления этой передачи. Тракт доставки информации, рассматриваемый в целом, и элементы этой системы (аппаратура связи) относятся к восстанавливаемым системам и элементам. Основными количественными характеристиками надежности последних являются наработка на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, время восстановления и время профилактики.

Наработкой на отказ называется промежуток времени от момента окончания восстановления после отказа до момента появления следующего отказа. При этом следует иметь в виду, что всю «жизнь» системы (элемента) можно разбить на три периода.

В первом периоде — периоде приработки — количество отказов, происшедших в единицу времени, резко уменьшается с течением времени за счет устранения скрытых дефектов изготовления, проявляющихся в начале работы системы (элемента). Отказы, появляющиеся в этот период, носят название приработочных.

Второй период — период нормальной работы — характеризуется тем, что количество отказов, возникающих в единицу времени, практически является постоянной величиной. Эти отказы называются внезапными и не могут быть предупреждены для увеличения надежности заменой элементов, так как новые элементы внесут в систему дополнительные приработочные отказы.

В третьем периоде - периоде износа — количество отказов в единицу времени резко увеличивается со временем за счет старения элементов. Отказы, возникающие в этот период, получи-

ли название постепенных, или износовых, и могут быть предупреждены путем замены изношенных элементов новыми.

Наработка на отказ $T_0$ является математическим ожиданием случайной величины $\tau$ — времени «жизни» (работы) элементов. В тех случаях, когда износ систематически предотвращается путем замены элементов до окончания периода нормальной работы или когда заменяются только отказавшие элементы, отказы системы образуют пуассоновский поток и вероятность появления ровно $n$ отказов за время $t$ может быть определена по формуле, приведенной в табл. 2.1:

$$P(n) \quad \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t},$$

где $n$ — число замен отказавших элементов за время $t$; $\lambda$ — интенсивность отказов среднее число отказов за единицу времени. Как было показано в разд. 2.1 при пуассоновском входящем потоке длительность интервалов между соседними вызовами подчиняется экспоненциальному закону (2.4), но в данном случае вероятность того, что за время $t$ отказов не произойдет, есть вероятность безотказной работы $q_0(t)$. Вероятность появления отказов за время $t$

$$P - 1 - q_0(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \tag{2.15}$$

т. е. эта вероятность подчинена показательному распределению. В период нормальной работы интенсивность отказов, как указывалось выше, является постоянной величиной. В этот период

$$\lambda = 1/T_0. \tag{2.16}$$

Для периода износа обычно используется нормальный закон распределения.

У реальных элементов может произойти внезапный отказ, но параллельно идет и «старение» элемента, которое приводит к постепенному отказу. Такие элементы можно рассматривать состоящими из двух частей, в каждой из которых может произойти отказ только одного вида — внезапный или постепенный. Элемент работает до первого из этих отказов. Среднее время наработки на отказ тогда будет равно [35]

$$T_{ср} \approx \frac{1}{\lambda}\left(1 - e^{\lambda T_0 + \frac{\lambda^2 \sigma^2}{2}}\right). \tag{2.17}$$

Некоторые задачи надежности представляются моделями, описываемые законами распределения Вейбулла, Гамма, логарифмически-нормальным и др. (см. табл. 2.1).

Временем восстановления называется промежуток времени от момента появления отказа до момента окончания восстановления, а временем профилактики — средняя продолжительность профилактических работ, отнесенная к одному отка-

зу. Время восстановления и время профилактики имеют важное значение для оценки деятельности службы эксплуатации (см. гл. 9).

Основной характеристикой надежности восстанавливаемого элемента является коэффициент готовности $\kappa_г$, который равен вероятности того, что в момент $t$ этот элемент находится в исправленном состоянии. Из простых вероятностных соображений можно получить

$$\kappa_г = \frac{T_0}{T_0 + T_1}, \tag{2.18}$$

где $T_0$ — среднее время наработки на отказ; $T_1$ — среднее время восстановления.

Из ф-лы (2.18) следует, что коэффициент готовности есть средняя доля времени, которое элемент пребывает в исправленном состоянии. При экспоненциальных законах распределения длительности «жизни» элемента и времени восстановления

$$\kappa_г = \frac{\nu}{\lambda + \nu} = \frac{T_0}{T_0 + T_1}, \tag{2.19}$$

где $\nu$ — интенсивность восстановления.

Надежность системы связи определенным образом связана с надежностью составляющих ее элементов. Элементы могут соединяться в систему либо последовательно, либо параллельно. Последовательным называется такое соединение, при котором отказ любого элемента вызывает отказ всей системы. Параллельным называется такое соединение, при котором отказ системы наступит тогда, когда откажут все входящие в систему элементы. При рассмотрении надежности системы до первого отказа для случая последовательного соединения элементов, отказывающих независимо друг от друга, имеем

$$Q_{0\,посл}(t) = \prod_{i=1}^{n} q_i(t), \tag{2.20}$$

а для случая параллельного соединения

$$P_{0\,пар}(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \tag{2.21}$$

где $Q_{0\,посл}(t)$ — вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении элементов; $q_i(t)$ — вероятность безотказной работы $i$-го элемента в течение времени $t$; $n$ — число элементов, образующих систему; $P_{0\,пар}(t)$ — вероятность отказа системы при параллельном соединении элементов; $p_i(t)$ — вероятность отказа $i$-го элемента в течение времени $t$: $p_i(t) = 1 - q_i(t)$. Очевидно, что $P_{0\,пар}(t) = 1 - Q_{0\,пар}(t)$, где $Q_{0\,пар}$ — вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении.

Если все элементы, входящие в системы, имеют одинаковую надежность, то

$$Q_{0\,\text{посл}}(t) = [q(t)]^n;$$
$$P_{0\,\text{пар}}(t) = [p(t)]^n.$$

Если вероятности безотказной работы входящих в систему элементов подчиняются экспоненциальному закону, то

$$\left.\begin{aligned} T_{0\,\text{посл}} &= \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \ldots + \frac{1}{T_n}} \\ \lambda_{0\,\text{посл}} &= \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n \\ Q_{0\,\text{посл}}(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\ldots+\lambda_n)t} = e^{-\lambda_{0\,\text{посл}}t} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.22)$$

где $T_1, T_2, \ldots, T_n$ — средние наработки на отказ 1, 2, ..., $n$-го элементов, а $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ — соответствующие интенсивности отказов.

Надежность связи значительно увеличивается в р е з е р в и р о в а н н ы х с и с т е м а х, т. е. в таких системах, где параллельно основным рабочим элементам включаются резервные элементы. Например, на автоматических телефонных станциях резервируются источники питания, сигнально-вызывные устройства и т. д. При внезапном прекращении подачи электроэнергии от сети переменного тока или вследствие внутренних технических неисправностей выпрямительные устройства (основные рабочие элементы), от которых нормально производится электропитание автозала, уже не могут выполнить своих функций (отказывают). В этом случае включаются аккумуляторные батареи (резервные элементы), которые обеспечивают питание станции в течение всего времени отсутствия подачи электроэнергии от сети переменного тока.

В системах производственной связи используются три типа резервирования: нагруженное, ненагруженное и облегченное.

При н а г р у ж е н н о м р е з е р в и р о в а н и и основные резервные элементы находятся в одном и том же рабочем режиме. Нагруженное резервирование встречается в схемах транспортной связи, радиосвязи, при организации производственной громкоговорящей связи и т. д. Если $n$ элементов включены по схеме нагруженного резервирования (один элемент основной, а $n-1$ элементов — резервные), то вероятность безотказной работы всей резервированной системы

$$Q_{\text{пн}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - q_i(t)], \qquad (2.23)$$

где $q_i(t)$ — вероятность безотказной работы $i$-го элемента.

В случае н е н а г р у ж е н н о г о р е з е р в и р о в а н и я составляющие резерв элементы нормально находятся в отключенном состоянии и переходят в рабочий режим только при отказе предыдущего элемента. Примером ненагруженного резервирования явля-

ются взаимозаменяемые агрегаты сигнально-вызывных устройств производственных АТС (ПАТС), занятые и незадействованные пары комплексных телефонных сетей, резервирование радиостанций и т. д.

При расчете надежности системы с ненагруженным резервированием предполагается, что: а) резервный элемент не может отказать, когда он находится в отключенном состоянии; б) время, в течение которого отказавший элемент заменяется резервным, пренебрежимо мало и в) переключающее устройство абсолютно надежно. С учетом этих допущений вероятность возникновения отказа системы с ненагруженным резервом

$$P_{n\,\text{нн}}(t) \approx \frac{\prod_{i=1}^{n} p_i(t)}{n!}, \qquad (2.24)$$

где $p_i(t)$ — вероятность возникновения отказа $i$-го элемента.

В случае облегченного резервирования резервные элементы до момента включения в работу находятся в облегченном (дежурном) режиме, при котором вероятность возникновения отказа меньше, чем при рабочем режиме. Облегченное резервирование широко используется при организации производственной громкоговорящей связи, радиосвязи и в ряде других случаев.

Вероятность $P_{n0}(t)$ возникновения отказа в системе, где имеются один основной и $n$—1 резервных элементов, находящихся в облегченном режиме, приближенно равна:

$$P_{n0}(t) \approx \frac{\lambda_0(\lambda_0+\lambda_1)\cdot\ldots\cdot[\lambda_0+(n-1)\lambda_1]}{n!}\,t^n, \qquad (2.25)$$

где $\lambda_0$ — интенсивность отказа элементов в рабочем режиме; $\lambda_1$— то же, в облегченном режиме.

Если рассматриваемая система содержит $n$ элементов, то коэффициент готовности системы $\kappa_{\text{гс}}$ может быть вычислен так:

$$\kappa_{\text{гс}} = \prod_{i=1}^{n} \frac{T_{0i}}{T_{0i}+T_{1i}}, \qquad (2.26)$$

где $T_{0i}$, $T_{1i}$ — соответственно среднее время наработки на отказ и восстановления $i$-го элемента.

Решение конкретных задач надежности, как правило, связано со значительными вычислительными трудностями. Поэтому широко используются различные вспомогательные таблицы (например, [1, 21, 35, 70, 176, 184]) или ЭВМ. Большое количество формул расчета надежности в самых различных задачах приведено в [70]. В гл. 3 и 9 будут рассмотрены конкретные приложения теории надежности к решению некоторых задач построения сетей и организации обслуживания систем производственной связи.

## 2.3. РЕГРЕССИОННЫЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗЫ

*Общие положения.* Причинные связи, составляющие существо того или иного процесса или явления, могут иметь детерминированную или стохастическую природу. Если изменение каждого из определяющих данных процесс факторов приводит к результату, который можно предсказать заранее с полной уверенностью, то имеют место детерминированные зависимости. Их естественным обобщением являются стохастические зависимости, которые верны для рассматриваемых совокупностей в целом, но для каждого отдельного момента времени или отдельных элементов этих совокупностей допускают отклонения, носящие случайный характер. Объективный анализ стохастических зависимостей основан на двух методах математико-статистической обработки данных наблюдений — регрессионном и корреляционном.

Регрессионный анализ используется для установления связи между величинами, характеризующими рассматриваемый процесс или явление. Вид функции, связывающей данные величины, предполагается известным, и задача сводится к определению количественных параметров этой функции. Иногда говорят о «выравнивании» функции по аргументам, позволяющим избежать случайные для данного процесса отклонения.

Корреляционный анализ применяется для оценки тесноты связи и определения формы связи между случайными величинами, т. е. он включает в себя и регрессионный анализ. Зависимости, полученные на основе корреляционного анализа, называются линиями регрессии.

Объективный анализ связи между двумя случайными величинами, в первую очередь, основывается на корреляции двух переменных (парной корреляции). Под анализом парной связи понимается: а) определение наличия и тесноты зависимости между двумя переменными; б) определение наилучшего (с позиции определенного критерия) математического описания связи; в) выявление степени неопределенности найденной связи и погрешностей как исходных данных, так и полученных результатов.

*Коэффициент корреляции.* Допустим, что мы имеем две переменных величины — $x$ и $y$ — и нам известны их числовые значения в определенной области. Между значениями $x$ и $y$ возможно взаимно однозначное соответствие. В этом случае можно говорить о том, что существует функциональная зависимость между переменными или что $y$ является функцией $x$.

В реальной действительности возможны такие зависимости, когда каждому элементу $x$ соответствуют определенные значения $y$ только в среднем. Отклонения фактических значений $y$ от среднего возможны в результате действия множества случайных факторов, приводящих к существованию определенного закона распределения вероятностей указанных отклонений. Вполне логично предположение также и о том, что если значения аргумента $x$ в эксперименте

не являются фиксированными и если они подвержены действию тех же случайных факторов, то существует закон распределения вероятностей отклонения аргумента от его среднего значения. Полученные в результате эксперимента числовые значения переменных $x$ и $y$ содержат две составляющие: средние значения известной функциональной связи и случайные отклонения от этих значений. При этом под средними значениями аргумента и функции ($x$ и $y$) понимаются их математические ожидания.

Возьмем наиболее простой случай зависимости, когда связь между функцией и аргументом линейна, т. е. нам известны два вектора:

$$y = (y_1 - \bar{y},\ y_2 - \bar{y},\ \ldots,\ y_n - \bar{y});$$
$$x = (x_1 - \bar{x},\ x_2 - \bar{x},\ \ldots,\ x_n - \bar{x}),$$

где $y_1, y_2, \ldots, y_n$ — числовые значения функции; $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — числовые значения аргумента; $\bar{x}$, $\bar{y}$ — эмпирические средние значения функции и аргумента, т. е. $\bar{y} = \sum_1^n y_i/n$, $\bar{x} = \sum_1^n x_i/n$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$.

При наличии взаимооднозначного соответствия между $y$ и $x$ оба вектора являются линейно зависимыми, что соответствует сделанному предположению. Но два линейно зависимых вектора параллельны между собой. Из этого следует, что если векторы $x$ и $y$ не параллельны, т. е. образуют между собой какой-то угол, то между ними нет взаимооднозначного соответствия. Величина же угла при данных условиях явится количественной мерой отклонения фактической связи векторов от взаимооднозначного соответствия. Угол между векторами $\theta$ может быть определен по формуле:

$$\cos\theta = \frac{xy}{|x^2||y^2|}. \qquad (2.27)$$

Выражая соответствующие векторы через их компоненты, получим

$$\cos\theta = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{n\sigma_y\sigma_x} = r_{xy}, \qquad (2.28)$$

где $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}$ — среднее квадратическое отклонение $y$;

$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$ — среднее квадратическое отклонение $x$;

$r_{xy}$ — коэффициент линейной корреляции между $y$ и $x$, равный косинусу угла между векторами.

Коэффициент линейной корреляции по определению равен $\pm 1$, если векторы параллельны, т. е. существует функциональная за-

висимость между переменными. Если же коэффициент корреляции равен 0, то векторы перпендикулярны друг другу и никакой линейной связи между ними не существует.

Указанные соображения можно изложить и в другом виде, что может помочь более глубокому пониманию сущности явления.

Допущение, что между $y$ и $x$ существует линейная связь, означает наличие зависимости в следующем виде:

$$\widetilde{y_i} = \alpha_0 + \alpha_1 x_i, \tag{2.29}$$

где $\widetilde{y_i}$ — расчетное значение функции; $x_i$ — фактическое значение аргумента; $\alpha_0$, $\alpha_1$ — параметры уравнения.

Написанное выше уравнение называется в математической статистике линией (прямой) регрессии $y$ на $x$. Из сказанного ранее можно допустить также возможность построения линии (прямой) регрессии $x$ на $y$:

$$\widetilde{x_i} = \alpha_{0x} + \alpha_{1x} y_i, \tag{2.29'}$$

где $\widetilde{x_i}$ — расчетное значение $x$; $y_i$ — фактическое значение $y$; $\alpha_{0x}$, $\alpha_{1x}$ — параметры уравнения.

Если сравнить написанные выше два уравнения линий регрессии, то можно определить, что они равносильны только при условиях $x_i = \widetilde{x_i}$ и $y_i = \widetilde{y_i}$, т. е. математические ожидания функции и аргумента совпадают с их фактическими значениями. Как уже указывалось, такой случай может быть только при наличии функциональной зависимости $y$ от $x$. Но фактические значения $y_i$ отличаются от $\widetilde{y_i}$ тем больше, чем сильнее действие случайных факторов, вызывающих вариацию фактических значений $x$ и $y$.

Под т е с н о т о й с в я з и между двумя переменными будем понимать относительное значение вариации функции, вызываемой аргументом $x$, в общей вариации $y$. В статистике под вариацией величин понимают их среднее квадратическое отклонение. По физическому смыслу она равна длинам (модулям) векторов, о которых шла речь ранее.

Итак, будем считать, что $r_{yx} = \sigma_{y/x}/\sigma_y$, где $\sigma_{y/x}$ — среднее квадратическое отклонение $y$, вызываемое только действием аргумента $x$, а $\sigma_y$ — то же самое, но учитывающее действие не только аргумента $x$, но и всех прочих факторов. Нетрудно показать, что $r^2_{yx} = \alpha_1 \alpha_{1x}$. При функциональной связи обе линии регрессии совпадают, а потому $\alpha_1 = 1/\alpha_{1x}$ и $r_{yx} = \pm 1$. Чем больше угол между прямыми регрессии, тем меньше коэффициент корреляции $r_{yx}$.

Из изложенного ясно, что по величине коэффициента корреляции можно судить о наличии и тесноте связи между переменными $x$ и $y$, т. е. о близости векторов $x$ и $y$ к линейной зависимости и о удельном весе вариации, вызываемой фактором $x$, в общей вариации функции $y$. Количественной мерой тесноты связи является либо косинус угла между векторами (прямыми регрессии), либо от-

ношение соответствующих средних квадратических отклонений. Заметим при этом, что границы, в которых может изменяться коэффициент корреляции (от - 1 до +1), еще не содержат в себе критерия существенности связи между переменными.

Исходя из изложенного выше, параметры линейного уравнения зависимости могут быть определены следующим образом:

$$a_1 = r_{yx}\frac{\sigma_y}{\sigma_x};\quad a_0 = \bar{y} - a_1\bar{x}. \tag{2.30}$$

Как видно из формул, угловой коэффициент прямой — $a_1$ определяется величиной коэффициента корреляции и средними квадратическими отклонениями функции и аргумента.

Приведенные для расчета коэффициентов линейного уравнения формулы равнозначны формулам, получаемым при использовании метода наименьших квадратов.

*Метод наименьших квадратов.* Пусть предполагается, что зависимость признака А от признака Б имеет вид $y=f(x, a_1, a_2, \ldots, a_n)$, где $x$ — значение признака Б; $y$ — значение признака А; $a_i$ подлежащие определению параметры.

В результате эксперимента был получен следующий ряд данных:

$$x_1\ x_2 \cdots x_i \cdots x_m;$$
$$y_1\ y_2 \cdots y_i \cdots y_m.$$

Согласно методу наименьших квадратов наивероятнейшие значения параметров $a_i$ дают минимум функции

$$S = \sum_{i=1}^{n} [y_i - f(x_i;\ a_0,\ a_1,\ a_2,\ \ldots,\ a_n)]^2. \tag{2.31}$$

Если $f\ (x;\ a_0,\ a_1,\ a_2 \ldots, a_{n-1})$ имеет непрерывные частные производные по всем своим параметрам, то необходимое условие минимума функции $S$ представляет систему $n$ уравнений с $n$ неизвестными.

Нахождение функциональной зависимости между признаками А и Б называют выравниванием эмпирических данных вдоль кривой $y=f(x, a_0, a_1, a_2 \ldots, a_{n-1})$.

Если $f(x;\ a_0,\ a_1,\ a_2, \ldots, a_{n-1}) = a_1x + a_0$, то выравнивание производится вдоль прямой. Система уравнений, которая получается при дифференцировании (2.31), может быть преобразована в следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} a_1\sum_{i=1}^{m} x_i^2 + a_0\sum_{i=1}^{m} x_i &= \sum_{i=1}^{m} x_i y_i \\ a_1\sum_{i=1}^{m} x_i + a_0 m &= \sum_{i=1}^{m} y_i \end{aligned}\right\}. \tag{2.32}$$

При выравнивании по параболе $y=a_2x^2+a_1x+a_0$ указанная система уравнений с $n$ неизвестными может быть преобразована к виду

$$\left.\begin{aligned} a_2\sum_{i=1}^{m}x_i^4+a_1\sum_{i=1}^{m}x_i^3+a_0\sum_{i=1}^{m}x_i^2&=\sum_{i=1}^{m}x_i^2y_i\\ a_2\sum_{i=1}^{m}x_i^3+a_1\sum_{i=1}^{m}x_i^2+a_0\sum_{i=1}^{m}x_i&=\sum_{i=1}^{m}x_iy_i\\ a_2\sum_{i=1}^{m}x_i^2+a_1\sum_{i=1}^{m}x_i+a_0m&=\sum_{i=1}^{m}y_i \end{aligned}\right\}. \qquad (2.33)$$

Рассматривая систему (2.32) и приняв, что $\sum_{i=1}^{m}x_i=m\bar{x}$, а $\sum_{i=1}^{m}y_i=m\bar{y}$, получим первое и второе уравнения системы в виде:

$$\left.\begin{aligned} a_1\sum_{i=1}^{m}x_i^2+a_0m\bar{x}&=\sum_{i=1}^{m}x_iy_i\\ a_1\bar{x}+a_0&=\bar{y} \end{aligned}\right\}. \qquad (2.32')$$

Отсюда

$$\left.\begin{aligned} a_1&=\frac{\sum_{i=1}^{m}x_iy_i-m\bar{x}\,\bar{y}}{\sum_{i=1}^{m}x_i^2-m\bar{x}^2}=r_{yx}\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\\ a_0&=\bar{y}-a_1\bar{x} \end{aligned}\right\}. \qquad (2.30')$$

Из ур-ний (2.30′) видно, что коэффициенты прямой регрессии по определению корреляционной связи совпадают с теми же коэффициентами, определенными способом наименьших квадратов. А это значит, что корреляционные уравнения можно рассматривать как аппроксимирующие (приближающие) функции.

Примером использования метода наименьших квадратов может служить выравнивание вдоль прямой зависимости числа приборов (линий) от величины нагрузки при потерях $p=5^0/_{00}$ на отрезке от 6 до 196 линий. Экспериментальные данные сведены в табл. 2.3. Из таблицы следует, что функцией в данном случае является количество приборов (линий), обозначаемое через $v$, а аргументом — величина телефонной нагрузки, выраженная в часо-занятиях и обозначаемая через $y$. Выравнивание ведется по прямой вида

$$v=a_1y+a_0.$$

Таблица 2.3

ДАННЫЕ О ЗАВИСИМОСТИ КОЛИЧЕСТВА ПРИБОРОВ (ЛИНИЙ) $v$ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТЕЛЕФОННОЙ НАГРУЗКИ $y$ (ЧАСО-ЗАНЯТИЙ) ПРИ ПОТЕРЯХ $p$ 5%

| $y$ | $v$ | $y$ | $v$ | $y$ | $v$ | $y$ | $v$ | $y$ | $v$ | $y$ | $v$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,66 | 6 | 22,9 | 39 | 43,8 | 72 | 64,7 | 105 | 85,6 | 138 | 106,4 | 171 |
| 2,26 | 7 | 23,5 | 40 | 44,4 | 73 | 65,3 | 106 | 86,2 | 139 | 107,1 | 172 |
| 2,86 | 8 | 24,1 | 41 | 45,0 | 74 | 65,9 | 107 | 86,9 | 140 | 107,7 | 173 |
| 3,48 | 9 | 24,8 | 42 | 45,7 | 75 | 66,6 | 108 | 87,4 | 141 | 108,3 | 174 |
| 4,10 | 10 | 25,4 | 43 | 46,3 | 76 | 67,2 | 109 | 88,1 | 142 | 109,0 | 175 |
| 4,73 | 11 | 26,0 | 44 | 46,9 | 77 | 67,9 | 110 | 88,7 | 143 | 109,6 | 176 |
| 5,36 | 12 | 26,7 | 45 | 47,6 | 78 | 68,5 | 111 | 89,3 | 144 | 110,2 | 177 |
| 6,03 | 13 | 27,3 | 46 | 48,2 | 79 | 69,1 | 112 | 90,0 | 145 | 110,9 | 178 |
| 6,70 | 14 | 27,9 | 47 | 48,8 | 80 | 69,7 | 113 | 90,6 | 146 | 111,5 | 179 |
| 7,40 | 15 | 28,6 | 48 | 49,5 | 81 | 70,4 | 114 | 91,2 | 147 | 112,2 | 180 |
| 8,13 | 16 | 29,2 | 49 | 50,0 | 82 | 71,0 | 115 | 91,9 | 148 | 112,8 | 181 |
| 8,86 | 17 | 29,8 | 50 | 50,7 | 83 | 71,6 | 116 | 92,5 | 149 | 113,4 | 182 |
| 9,63 | 18 | 30,5 | 51 | 51,4 | 84 | 72,2 | 117 | 93,2 | 150 | 114,0 | 183 |
| 10,4 | 19 | 31,1 | 52 | 52,0 | 85 | 72,9 | 118 | 93,8 | 151 | 114,7 | 184 |
| 11,2 | 20 | 31,7 | 53 | 52,6 | 86 | 73,5 | 119 | 94,4 | 152 | 115,3 | 185 |
| 11,8 | 21 | 32,4 | 54 | 53,3 | 87 | 74,2 | 120 | 95,0 | 153 | 115,9 | 186 |
| 12,4 | 22 | 33,0 | 55 | 53,9 | 88 | 74,8 | 121 | 95,7 | 154 | 166,6 | 187 |
| 12,9 | 23 | 33,6 | 56 | 54,5 | 89 | 75,4 | 122 | 96,3 | 155 | 117,2 | 188 |
| 13,5 | 24 | 34,3 | 57 | 55,2 | 90 | 76,0 | 123 | 96,9 | 156 | 117,8 | 189 |
| 14,1 | 25 | 34,9 | 58 | 55,6 | 91 | 76,7 | 124 | 97,6 | 157 | 118,5 | 190 |
| 14,7 | 26 | 35,5 | 59 | 56,4 | 92 | 77,3 | 125 | 98,2 | 158 | 119,1 | 191 |
| 15,3 | 27 | 36,2 | 60 | 57,1 | 93 | 78,0 | 126 | 98,8 | 159 | 119,7 | 192 |
| 15,9 | 28 | 36,8 | 61 | 57,7 | 94 | 78,6 | 127 | 99,5 | 160 | 120,4 | 193 |
| 16,4 | 29 | 37,4 | 62 | 58,3 | 95 | 79,2 | 128 | 100,1 | 161 | 121,0 | 194 |
| 17,2 | 30 | 38,1 | 63 | 59,0 | 96 | 79,9 | 129 | 100,7 | 162 | 121,6 | 195 |
| 17,8 | 31 | 39,1 | 64 | 59,6 | 97 | 80,5 | 130 | 101,4 | 163 | 122,3 | 196 |
| 18,4 | 32 | 39,3 | 65 | 60,2 | 98 | 81,1 | 131 | 102,0 | 164 | | |
| 19,1 | 33 | 40,0 | 66 | 60,9 | 99 | 81,7 | 132 | 102,6 | 165 | | |
| 19,7 | 34 | 40,6 | 67 | 61,5 | 100 | 82,4 | 133 | 103,3 | 166 | | |
| 20,3 | 35 | 41,2 | 68 | 62,1 | 101 | 83,0 | 134 | 103,9 | 167 | | |
| 21,0 | 36 | 41,9 | 69 | 62,8 | 102 | 83,6 | 135 | 104,5 | 168 | | |
| 21,6 | 37 | 42,5 | 70 | 63,4 | 103 | 84,3 | 136 | 105,2 | 169 | | |
| 22,2 | 38 | 43,1 | 71 | 64,0 | 104 | 84,9 | 137 | 105,9 | 170 | | |

Общее количество точек $m = 191$. Учитывая, что

$$\sum_{i=1}^{191} y_i = 11800; \quad \sum_{i=6}^{196} v = 19200; \quad \sum_{i=1}^{191} y_i^2 = 970000; \quad \sum_{i=1}^{191} v_i y_i = 1590000,$$

система (2.32′) примет вид:

$$\left.\begin{aligned} \alpha_1 970 \cdot 10^3 + \alpha_0 \cdot 11{,}8 \cdot 10^3 &= 1590 \cdot 10^3 \\ \alpha_1 11{,}8 \cdot 10^3 + \alpha_0 191 &= 19{,}2 \cdot 10^3 \end{aligned}\right\}.$$

Решая эту систему, получим $\alpha_1 = 1{,}578$, $\alpha_0 = 2{,}961$.
Следовательно

$$v = 1{,}578\, y + 2{,}961. \qquad (2.34)$$

Коэффициент корреляции функции (2.34) равен $r = 0{,}9999$, сумма квадратов отклонений расчетных и фактических данных:

$$\sum_{i=1}^{191} (v_i - v_{yi})^2 = 5{,}9.$$

Таким образом, почти достоверно (с точностью до $10^{-4}$) установлено, что зависимость числа линий от нагрузки может быть представлена прямой (2.34). Отклонения фактических данных от результатов расчетов по ф-ле (2.34) настолько пичтожны, что среднее квадратическое отклонение на интервале значений от 6 до 196 линий не превышает $\sqrt{5{,}9} = 2{,}4$ линии.

*Корреляционное отношение.* Если линии регрессий отличны от прямых, то коэффициент корреляции не дает полного представления о силе связи между соответствующими признаками $A$ и $Б$. В этом случае за меру зависимости признака $A$ от признака $Б$ принимают отношение среднего квадратического отклонения условных средних $\bar{y}_x$ относительно общей средней $\bar{y}$ к среднему квадратическому отклонению признака $A$. Эта величина называется корреляционным отношением $A$ от $Б$ и обозначается через $\eta_{y/x}$. Аналогично вводится и $\eta_{x/y}$.

Допустим, распределение признаков $A$ и $Б$ дается корреляционной табл. 2.4.

Очевидно, в табл. 2.4 обеспечивается равенство $N = \sum_{j=1}^{n} m_{yj} = \sum_{i=1}^{k} m_{xi}$. Тогда корреляционные отношения будут равны:

$$\eta_{y/x} = \frac{\sigma(\bar{A}_x)}{\sigma(A)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} m_{x_i} (\bar{y}_{x_i} - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^{n} m_{y_j} (y_j - \bar{y})_2}}; \qquad (2.35)$$

Таблица 2.4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРИЗНАКОВ А И Б

| Показатели признака $Б$ | Частоты появления статических данных при значениях показателя признака $A$ | | | | | | Суммарное значение частот появления показателя признака $Б$ (сумма по строкам) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $y_1$ | $y_2$ | . . . | $y_j$ | . . . | $y_n$ | |
| $x_1$ | $m_{11}$ | $m_{12}$ | . . . | $m_{1j}$ | . . . | $m_{1n}$ | $m_{x_1}$ |
| $x_2$ | $m_{21}$ | $m_{22}$ | . . . | $m_{2j}$ | . . . | $m_{2n}$ | $m_{x_2}$ |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| $x_i$ | $m_{i_1}$ | $m_{i_2}$ | . . . | $m_{i_j}$ | . . . | $m_{i_n}$ | $m_{x_i}$ |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| $x_k$ | $m_{k_1}$ | $m_{k_2}$ | . . . | $m_{k_j}$ | . . . | $m_{k_n}$ | $m_{x_k}$ |
| Суммарное значение частот появления показателя признака $A$ (сумма по столбцам) | $m_{y_1}$ | $m_{y_2}$ | . . . | $m_{y_j}$ | . . . | $m_{y_n}$ | $N$—объем выборки |

$$\eta_{x/y} = \frac{\sigma(\bar{E}_y)}{\sigma(\bar{E})} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} m_{yj}(\bar{x}_{y_j} - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{k} m_{x_i}(x_i - \bar{x})^2}}. \qquad (2.36)$$

Корреляционное отношение обладает следующими свойствами:

1) оно всегда заключено между 0 и 1;

2) необходимое и достаточное условие отсутствия корреляционной зависимости признака $A$ от признака $Б$ состоит в том, что $\eta_{y/x}=0$;

3) если $\eta_{y/x}=1$, то между признаками $A$ и $Б$ существует функциональная зависимость $y=f(x)$;

4) коэффициент линейной корреляции между признаками $A$ и $Б$ всегда по абсолютной величине не больше корреляционных отношений $\eta_{y/x}$ и $\eta_{x/y}$;

5) если $u=\alpha(x-x_0)$, а $v=\beta(y-y_0)$, то $\eta_{v/u}=\eta_{y/x}$ и $\eta_{u/v}=\eta_{x/y}$ (при $\alpha>0$ и $\beta>0$).

При определении формы зависимости по экспериментальным данным необходимо считаться с тем, что любая форма является только приближением (аппроксимацией) к некой теоретической закономерности. Линейная зависимость имеет силу вблизи арифметических средних. Однако если распределение эмпирических данных

в большей мере сконцентрировано вблизи геометрических средних, то лучшим приближением является не линейная, а степенна́я зависимость. Поэтому полезным аппаратом при выборе формы зависимости является сравнение значений средней арифметической и средней геометрической. Часто для описания одних и тех же данных можно использовать различные формулы, в особенности, если данные относятся только к части кривой регрессии.

Очень важно иметь теоретическое представление о том, какова должна быть эмпирическая форма зависимости. Если же такого представления нет, то существенную помощь нам может оказать анализ величин коэффициента корреляции и корреляционного отношения. Из сказанного выше ясно, что эмпирическим данным наилучшим образом соответствует кривая, имеющая наибольшее корреляционное отношение. Однако при этом мы подходим к вопросу о том, каково должно быть значение корреляционного отношения, при котором можно признать найденное уравнение связи существенным.

*Определение степени существенности найденных связей и погрешностей результатов.* За исключением крайних случаев, когда коэффициент корреляции или корреляционные отношения равны нулю или единице, трудно утверждать что-нибудь обоснованное о существенности связи между двумя переменными. Поэтому необходимо ввести какое-то допущение, позволяющее преодолеть указанную трудность. Подобное допущение вполне естественно формулируется если вспомнить, что при корреляционной связи значения переменных находятся под воздействием случайных факторов. Отклонения фактических значений переменных от их математического ожидания подчиняются тому или иному закону распределения. По закону больших чисел при увеличении числа наблюдений разность между эмпирическими величинами и их математическими ожиданиями становится бесконечно малой. По существу, здесь идет речь о необходимости предельного перехода, а именно — об определении предела той или иной величины при условии, что число наблюдений стремится к бесконечности.

В отношении коэффициента корреляции можно утверждать, что он отражает существенную, приближающуюся к функциональной, связь, если его пределом при названных выше условиях является $\pm 1$, и, напротив, если его пределом является нуль, то переменные стохастически независимы между собой. Условием практического решения этой задачи является знание закона распределения коэффициента корреляции в зависимости от числа наблюдений. Для корреляционного отношения аналогичными пределами являются $+1$ и 0 с требуемой степенью точности.

При анализе связи между двумя переменными ($y$, $x$) ошибки измерения будут влиять на дисперсии и коэффициент корреляции. Обозначим ошибки измерения через $v_1$ и $v_2$. Ошибки измерения стохастически независимы и не зависят от $y$, $x$, а их математические ожидания (средние значения) в пределе равны нулю. Тогда

$$r_{(y+v_1)(x+v_2)} = \frac{r_{yx}}{\sqrt{\left[1+\left(\frac{\sigma_{v1}}{\sigma_y}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_x}\right)^2\right]}}, \qquad (2.37)$$

т. е. коэффициент корреляции переменных, на которых наложены ошибки измерения, всегда меньше по абсолютной величине, чем коэффициент корреляции этих переменных без ошибок. Отношение указанных коэффициентов корреляции зависит от отношений дисперсий ошибок и дисперсий переменных. Поэтому большие погрешности в исходных данных маскируют имеющуюся корреляцию. С увеличением же числа наблюдений погрешности измерения становятся все менее существенными и эмпирический коэффициент корреляции приближается к его теоретическому значению.

В математической статистике прибегают к иным методам оценки коэффициента корреляции, при которых описанная выше возможность предельного перехода используется не непосредственно, а косвенно. Для этого используются критерии значимости определенной гипотезы. Проверяется предположение о том, что различие между эмпирическим и теоретическим значениями коэффициента корреляции несущественно при определенном уровне вероятности (уровне значимости). В результате проверки не может быть сделано категорического вывода о верности гипотезы по результатам наблюдений. Речь может идти только о том, что данная гипотеза не может быть отвергнута.

Для оценки коэффициента корреляции используется найденное Фишером преобразование, на основе которого построены таблицы критических значений коэффициентов корреляции при данном числе наблюдений и уровне значимости [184]. По этим таблицам можно определить ту величину коэффициента, которая указывает на существенную связь между факторами [1]).

Следует рассмотреть вопрос об ошибках исходной информации и ошибках результатов, полученных при использовании формул парной корреляции. Как известно, ошибки исходной информации, если они являются случайными ошибками измерения, могут быть оценены только в среднем. Величина ошибки каждого отдельного наблюдения не может быть определена. Понятно, что ошибка результата зависит от ошибки исходной информации. В среднем эту зависимость можно оценить путем сравнения средней ошибки исходной информации с отклонениями фактических значений функции от ее значений, рассчитанных по корреляционной формуле. Минимально возможная точность корреляционной формулы (с вероятностью 0,997) дает отклонения расчетных значений от фактических, не превышающих трехкратной средней ошибки исходной информации. Вероятность же нахождения этих отклонений в пре-

[1]) При уровне значимости 0,01 и числе наблюдений без двух, равном 5, критическая величина коэффициента корреляции равна 0,8745; равном 10 — 0,7079; равном 20 — 0,5768; равном 50 — 0,3541; равном 100 — 0,2540 и т. д.

Таблица 2.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРИЗНАКОВ *А, Б* И *В*

| Значение показателей признаков | | | Частота появления статистических данных |
|---|---|---|---|
| *А* | *Б* | *В* | |
| $x_1$ | $y_1$ | $z_1$ | $m_1$ |
| $x_2$ | $y_2$ | $z_2$ | $m_2$ |
| . . . | . . . | . . . | . . . |
| $x_i$ | $y_i$ | $z_i$ | $m_i$ |
| . . . | . . . | . . . | . . . |
| $x_n$ | $y_n$ | $z_n$ | $m_n$ |

делах средней ошибки равна 0,683, т. е. в общем также достаточно велика.

*Множественная корреляция.* На практике часто приходится исследовать статистические связи между тремя и большим числом признаков. Например, на стоимость АТС оказывают влияние система оборудования и емкость станции, на стоимость диспетчерского коммутатора емкость, масса, количество блоков в комплекте, проводность абонентских линий и т. д.

Пусть дана следующая статистическая совокупность (табл. 2.5).

Если предположить, что зависимость признака *В* от признаков *А* и *Б* имеет вид $z=ax+by+c$, а отклонения табличных значений признака *В* от соответствующих значений приведенной функции носят случайный характер, то коэффициенты *a, b, c* могут быть определены по методу наименьших квадратов, который дает следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left.\begin{aligned} a\overline{x^2}+b\overline{xy}+c\overline{x}&=\overline{xz}\\ a\overline{xy}+b\overline{y^2}+c\overline{y}&=\overline{yz}\\ a\overline{x}+b\overline{y}+c&=\overline{z}\end{aligned}\right\}. \qquad (2.38)$$

Решая эту систему, находим, что

$$a=\frac{r(x,\ z)-r(y,\ z)\,r(x,\ y)}{1-r^2(x,\ y)}\,\frac{\sigma_z}{\sigma_x}; \qquad (2.39)$$

$$b=\frac{r(y,\ z)-r(x,\ z)\,r(x,\ y)}{1-r^2(x,\ y)}\,\frac{\sigma_z}{\sigma_y}; \qquad (2.40)$$

$$c=\overline{z}-a\overline{x}-b\overline{y}, \qquad (2.41)$$

где $r(x, y)$ — коэффициент линейной корреляции между признаками *А* и *Б*; $r(y, z)$ — то же, между признаками *Б* и *В*; $r(x, z)$ — то же, между признаками *А* и *В*; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — средние квадратические отклонения показателей признаков *А, Б* и *В*; $\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}$ — средние арифметические значения показателей признаков.

*Характеристики линий регрессии.* При применении регрессионного анализа важно уметь определять математическое ожидание, дисперсию и последующие моменты, коэффициенты ассиметрии и эксцесса, поскольку каждая из этих величин характеризует ту или иную особенность линии регрессии.

Моментом $k$-го порядка $\mu_k(a)$ варьирующего признака *А* по отношению к значению *a* называют среднее арифметическое из $k$-х степеней отклонений значений признака от *a*, т. е.

$$\mu_k(a)=\overline{(A-a)^k}. \qquad (2.42)$$

Если $a=0$, момент называется *начальным*, при $a=\bar{A}$ его называют *центральным* ($\mu_k$). Таким образом, за меру тесноты линейной связи между признаками $B$ и $A$ и $Б$ принимают совокупный коэффициент корреляции

$$R_{z,\,xy}=\sqrt{\frac{r^2(x,\,z)+r^2(y,\,z)-2r(x,\,z)\,r(y,\,z)\,z(x,\,y)}{1-r^2(x,\,y)}}. \quad (2.43)$$

Совокупный коэффициент линейной корреляции обладает следующими свойствами:

1) величина его всегда заключена между нулем и единицей;

2) если $R_{z,\,xy}=0$, то между признаком $B$ и признаками $A$ и $Б$ отсутствует линейная зависимость;

3) если $R_{z,\,xy}=1$, то признак $B$ находится в линейной функциональной зависимости от признаков $A$ и $Б$ $(z=ax+by+c)$.

Для установления влияния признака $A$ (или признака $Б$) на изменение признака $B$ пользуются *частным коэффициентом корреляции*

$$r_{B.\,zx}=\frac{r(x,\,z)-r(y,\,z)\,r(xy)}{\sqrt{[1-r^2(x,\,y)]\,[1-r^2(y,\,z)]}}. \quad (2.44)$$

Аналогично определяется и величина $r_{A.\,zy}$. Свойства частных коэффициентов корреляции такие же, как и свойства коэффициентов линейной *корреляции:*

$$\mu_k=\mu_k(\bar{A})=\overline{(A-\bar{A})^k}. \quad (2.45)$$

Нетрудно видеть, что дисперсия является вторым центральным моментом. Наличие третьего и последующих моментов указывает на то, что распределение случайных величин отклонений эмпирических данных и точек линии регрессии отклоняется от нормального закона.

*Ассиметрия* является показателем отклонения распределения признака $A$ от симметрии относительно $\bar{A}$ и вычисляется по формуле:

$$\alpha=\mu_3/\sigma_3. \quad (2.46)$$

Пределы значений асимметрии $\alpha$ от $-\infty$ до $+\infty$. При $\alpha=0$ распределение случайных величин, характеризующих отклонения статистических данных и точек линии регрессии, симметрично: $\mu_0 A=\bar{A}$. При $\alpha>0$ $\mu_0 A<\bar{A}$; при $\alpha<0$ $\mu_0 A>\bar{A}$.

*Эксцессом* называют величину

$$\varepsilon=\frac{\mu_4}{\sigma_4}-3, \quad (2.47)$$

которая показывает степень крутости кривой распределения признака $A$ по сравнению с крутостью нормального закона распределения. При $\varepsilon=0$ распределение нормальное. Если $\varepsilon>0$, то крутость положительная и кривая распределения имеет более острую вер-

шину, чем нормальное распределение. Если же $\varepsilon<0$, то крутость отрицательная и кривая имеет более плоскую вершину. В этом случае в центре распределения возможны выемки (двухмодальная кривая).

## 2.4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

*Общие положения.* Прогнозирование является элементом научных основ планирования и позволяет принимать обоснованные плановые решения на всех уровнях управления, так как выявляет объективные закономерности тех или иных процессов. Однако прогнозирование отличается от других методов планирования тем, что дает не абсолютно достоверную, а вероятностную оценку указанным закономерностям, которая содержит в себе определенные допуски или области возможных значений рассматриваемой функции.

Прогнозирование представляет собой процесс определения количественных оценок тех или иных параметров процесса в будущем, если известна предыстория данного процесса, либо в зависимости от времени, либо в зависимости от каких-то иных аргументов, характеризующих развитие (например, мощность предприятия, численность трудящихся и т. д.). При этом имеется в виду, что развитие рассматриваемого процесса определяется не только прошлым, но и настоящим и будущим. Объектом прогноза являются наиболее существенные параметры, определяющие протекание процесса.

Процесс разработки прогноза подразделяется [170] на четыре этапа: 1) анализ процесса; 2) выбор методического принципа и математических посылок; 3) реализация методов прогнозирования для рассматриваемого процесса; 4) анализ результата прогнозирования.

*Анализ процесса.* Различают три типа процессов: продолжающиеся, начинающиеся и дополняющие. Если рассматриваемый параметр процесса в течение прогнозируемого отрезка времени (или интервала мощностей или другого какого-либо показателя развития процесса) стремится к нулю, а до периода прогноза влияние его было незначительным или отсутствовало совсем, то такой процесс называется п р о д о л ж а ю щ и м с я и определяется ранее действовавшими параметрами. Наоборот, если в течение прогнозируемого периода действие прежних параметров стремится к нулю, то процесс называется н а ч и н а ю щ и м с я.

Существуют три разновидности продолжающихся процессов: процессы замены, насыщения и стадийные П р о ц е с с ы з а м е н ы представляют собой последовательность замен технических устройств, например, вследствие истечения технической долговечности. Указанные процессы базируются на фактическом наличии этих устройств и наиболее просто прогнозируются, исходя из предшествующего развития.

Процессы насыщения предполагают наличие какого-то предела, при достижении которого функция, характеризующая развитие процесса, не возрастает. Примером процессов насыщения является оснащение промышленных предприятий и строек средствами связи того или иного вида. Имеются пределы количества телефонных аппаратов ПАТС в цехе (как правило, не больше числа работающих; на автоматизированных предприятиях — не больше числа основных и резервных пунктов контроля, учета и регулирования); количества радиостанций на автомашине или механизме; количества громкоговорителей производственной громкоговорящей связи в одном помещении и т. д. Процессы насыщения трудно предвидеть, так как на основе простой экстраполяции не всегда можно установить пределы насыщения. С другой стороны, эти пределы могут быть оценены или даже определены с большей или меньшей точностью исходя из технических, организационных, экономических соображений или путем сопоставления с аналогичными предприятиями, цехами, участками и т. д.

В ряде случаев процесс насыщения может содержать не только одно предельное, но и несколько так называемых пороговых значений. Пороговые значения отмечаются там, где развитие распадается на ряд частных (последовательных или параллельных) процессов, и характеризуют значение прогнозируемой функции в моменты существенных изменений в рамках основного процесса. Математически пороговые значения отображаются точками перегиба, скачка или экстремума.

Стадийный процесс охватывает несколько детерминированных процессов, разграниченных во времени. Пример стадийного процесса — разработка и внедрение систем производственной связи (см. разд. 1.5), включающие в себя предпроектные работы, проектирование, организацию внедрения, изготовление оборудования, монтаж, эксплуатацию.

В процессах замены, насыщения и стадийных непрерывность развития превалирует над его дискретностью. В начинающихся процессах, наоборот, на первом плане выступает прерывность развития. Раскрыть неопределенность начинающихся процессов, в принципе, можно лишь путем прогнозов, предусматривающих определенные допуски. Начинающиеся процессы разделяются на исходные процессы и процессы замещения. Первопричинами начинающихся процессов в области производственной связи является технический прогресс в этой области, а также изменения в организации, технологии и управлении основного производства.

Процесс замещения в условиях производственной связи представляет собой отражение современной научно-технической революции в рассматриваемой области, вследствие которой устаревшие типы оборудования, а также схемы организации связи заменяются на более прогрессивные, обеспечивающие большую оперативность, высокие достоверность, надежность и удобство обслуживания. Дополняющие процессы, являющиеся промежуточными

между продолжающимися и начинающимися, разделяются на процессы восполнения и дополнения.

Процесс восполнения имеет место на промышленных предприятиях и стройках, оснащение которых средствами связи отстает от их потребностей, а следовательно, и от аналогичных показателей для других предприятий и строек, а также от средних показателей по отрасли. Этот процесс может быть и продолжающимся, и начинающимся, и тем и другим вместе для различных средств производственной связи.

Процессы дополнения могут осуществляться не только на отстающих в оснащении средствами связи предприятиях, но и на передовых при увеличении объема производства, появлении новых цехов и т. д.

*Выбор методического принципа и математических посылок.* Прогнозирование продолжающихся процессов базируется на экстраполяции, а прогнозирование начинающихся процессов — на обратном расчете (рефлексивном методе). Экстраполяция и обратный расчет являются методическими принципами прогнозирования.

Экстраполяция — распространение области действия функции, часть переменных которой уже известна, на более обширную область в соответствии с закономерностями, действие которых установлено в той области, где параметры известны. Другими словами, экстраполяция представляет собой перспективный расчет на основе присущих системе закономерностей, отражающих сложившуюся тенденцию развития. Этот расчет может выполняться и на основе гипотезы о динамике процесса в будущем в увязке с характеристиками прошедшего этапа развития.

Обратный расчет — это метод нахождения промежуточных характеристик процесса Обратный расчет может осуществляться либо при заданных исходных параметрах и гипотезе о будущем развитии, либо при заданных целевых параметрах. В первом случае для получения прогноза необходимо рассчитать точку пересечения кривой фактического развития и кривой, соответствующей гипотезе о будущем развитии.

Методика прогностической экстраполяции содержит в себе методы выбора типа прогностической функции, методы подбора кривых к выбранному типу функции, выбор критериев выравнивания. Допустим, что рассматривается функция $y=f(t)$, где $y$ — текущее значение прогнозируемой функции. Конкретный вид этой функции выбирается на основе теоретических, эмпирических или логических посылок.

Если задана одна точка, а информация и предположения о тенденциях развития отсутствуют, то имеет место простейший случай, а именно $y=\text{const}$, т. е. заданное значение сохраняется и для будущего. Подобное положение встречается весьма часто — укрупненные показатели оснащения промышленных предприятий и строек средствами производственной связи, среднеотраслевые показатели и т. п.

Однако следует иметь в виду, что даже самая грубая экстраполяция лучше, чем точечная оценка [170]. Если задано несколько точек, характеризующих процесс в прошлом, $y_1(t_1)$; $y_2(t_2)$; $y_3(t_3)$..., то выбор вида функции производится исходя из взаимного расположения указанных точек. При этом важно подчеркнуть, что на эмпирическом поле рассеивания можно построить бесконечное множество кривых, поэтому необходима дополнительная информация для придания определенности при выборе конкретного вида функции.

Наиболее легкий путь — подбор двух- или многопараметрической функции, из которых наиболее широко применяются степенная вида $y=at^b$ и полиномы соответствующих степеней $y=a_0+a_1t+a_2t^2+...$ Полиномы позволяют достичь наибольшего сближения с эмпирическими величинами. Теоремой Вайерштраса [148] доказывается, что любая функция, не теряющая непрерывности в интервале $(a, b)$, может быть отображена в нем с любой степенью точности. Степень полинома, который должен быть использован для аппроксимации рассматриваемого временно́го ряда, может быть определена исходя из условия: $y_{i+1}-y_i=\text{const}$. Номер шага, на котором выполняется это условие, численно равен степени полинома.

Другим путем определения вида функции является использование особенностей рассматриваемого процесса, которым должны соответствовать определенные свойства функции. Особенностями процесса могут быть: монотонное возрастание, монотонное убывание, наличие экстремума (комбинированная возрастающая и убывающая функции); наличие предела насыщения, наличие точки перегиба; симметричность. В соответствии с этими особенностями и должны выбираться конкретные функции. В самом деле, если, например, процесс по своей сущности содержит экстремум, то прогностическая функция не может быть представлена прямой линией.

Третий путь определения вида функции состоит в установлении типа роста рассматриваемого процесса. Могут быть приняты во внимание три простейших случая.

1. Первая производная постоянна, т. е. $dy/dt=\text{const}$. Это означает, что абсолютный прирост рассматриваемой величины постоянен в единицу времени. Данному положению соответствует прямая $y=a_0+a_1t$.

2. Логарифмическая производная постоянна, т. е. $\frac{dy/dt}{y}=\frac{dy}{ydt}=\frac{d(\log y)}{dt}=\text{const}$. Это означает, что относительный прирост, т. е. прирост в единицу времени при заданном уровне рассматриваемого параметра, — постоянная величина. Такую ситуацию отражает степенная функция вида $y=ab^t$.

3. Эластичность функции постоянна, т. е. $\frac{dy/y}{dt/t}=\frac{d(\log y)}{d(\log t)}=\text{const}$.

Эластичность представляет собой безразмерную величину, не зависящую от выбора масштаба измерения. Если она постоянна,

то имеет место степенная функция вида $y = at^b$. Кривые к заданному типу функции находятся подбором параметров таким образом, чтобы конкретная реализация данной функции как можно точнее совпала с эмпирическим полем рассеивания. Параметры могут подбираться [170] по двум или нескольким точкам (например, по уравнению прямой, проведенной через две крайние точки статистического ряда), а также по всем точкам с использованием методов: возрастающей суммы, трех точек, наименьших квадратов, экспоненциального (или какого-либо другого), выравнивания. Последний метод применяется при неравнозначности исходных данных. Ниже параметры в основном определяются методом наименьших квадратов, описанным в предыдущем разделе.

Критериями приведения прогностической функции в соответствии с данными статистического ряда могут быть различные меры расхождения статистических и теоретических функций, используемые в математической статистике.

При использовании любых критериев подбора функций следует учитывать, что не всегда формальная статистическая логика совпадает с логикой вещей и не всегда, следовательно, возможно применение критериев подбора для наилучшей увязки функции с тенденциями фактического развития. Иногда использование приемлемой функции увеличивает расхождение между теоретической функцией и фактическими данными. В этих случаях правильность подбора функции не может служить критерием достоверности прогноза. И, наконец, встречаются ситуации, когда близость теоретической функции к исходным данным является приблизительно одинаковой для нескольких функций, а конечные результаты расчетов существенно отличаются друг от друга. Здесь также критерии подбора функций не являются действенными.

Методика обратного расчета в основном базируется на эвристических методах. Допустим, что известны цель рассматриваемого процесса, задаваемая как величина, неизменная во времени (например, уровень насыщения — требуемое количество телефонных аппаратов диспетчерской связи на 1000 работающих в отрасли), и существующий уровень развития, характеризуемый какой-либо величиной данного показателя. Разницу между этими двумя величинами обозначим через $u$, а показатель темпа развития, необходимого для достижения целевого уровня, через $\omega$. Геометрически $\omega$ представляет собой угол наклона прямой, соединяющей требуемый уровень насыщения и достигнутый уровень, к оси абсцисс.

Возможны две постановки задачи.

1. Определить период времени $\Delta t$, в течение которого будет достигнут заданный уровень, если темп роста $\omega$ и величина $u$ известны. Искомый период находится по формуле

$$\Delta t = \frac{u}{\operatorname{tg} \omega}. \qquad (2.48)$$

2. Определить собственный темп развития, если период времени, в течение которого будет достигнут заданный уровень, установлен извне:

$$\operatorname{tg}\omega = \frac{u}{\Delta t}. \qquad (2.49)$$

*Реализация методов прогнозирования.* Наиболее часто для прогнозирования используется простая прогностическая экстраполяция. Если имеется последовательность чисел, характеризующих развитие процесса в прошлом, то формула, используемая для приведения этой последовательности в соответствие с выбранной кривой, применяется и для оценки развития данного процесса в будущем. Исходную последовательность чисел называют *временным рядом*, поскольку наиболее часто прогнозируется поведение тех или иных процессов во времени. Однако, как уже отмечалось выше, можно рассматривать и последовательности чисел, прямо не зависящие от времени, а определяемые мощностями промышленных предприятий, объемом строительно-монтажных работ, численностью трудящихся и т. д. Уязвимость такого метода прогнозирования заключается в том, что он базируется, как правило, на не подтверждаемом практикой предположении: будущее целиком определяется прошедшим - и не позволяет установить причинных связей, обусловивших ход процесса. Полученная кривая дает внешнее, формализованное отображение совокупного воздействия всех факторов на зависимую переменную. Она не дает возможности судить о структуре факторов воздействия и удельном весе каждого из них, вследствие чего механизм взаимодействия остается нераскрытым. Привлекая к расчетам несколько реально взаимосвязанных числовых последовательностей, можно частично устранить последний недостаток, но, тем не менее, целесообразность применения простой прогностической экстраполяции, как правило, находится под сомнением.

На практике вместо простой экстраполяции применяются регрессионный и корреляционный анализы. В этих случаях переменными, характеризующими процесс, являются показатели, в определенной мере описывающие причинные взаимосвязи прогнозируемых явлений. Примерами могут служить зависимость стоимости автоматической телефонной станции координатной системы от ее емкости; диаметра кабельного сердечника от числа пар и диаметра жил и т. п. Здесь учитывается вероятностный характер рассматриваемого процесса. Регрессионный анализ (см. разд. 2.3) позволяет количественно определить систематическую (не случайную) составляющую процесса с помощью выбора математической функции аналогично тому, как это делалось при простой прогностической экстраполяции, которая может рассматриваться как частный случай регрессионного анализа (простая регрессия). Задача корреляционного анализа (см. разд. 2.3) заключается в количественном определении случайной составляющей.

Если построить временной (или какой-либо аналогичный) ряд невозможно, но известны сложившиеся пропорции и особенности элементов, составляющих рассматриваемый процесс, прибегают к так называемому структурному анализу. Исходные данные для этого анализа получить, как правило, значительно легче, чем для регрессионного анализа. Информация о структуре может сохранять свою ценность в течение длительного времени. Успех применения структурного анализа зависит от правильного выбора структурообразующих позиций, особенно тех, которые еще не играют значительной роли в настоящее время, но будут иметь большое значение в будущем. При структурном анализе экстраполируются не показатели, характеризующие развитие процесса, а показатели, отражающие структурные взаимосвязи внутри данного процесса. Если эти связи неизменны во времени (или по шкале мощностей промышленных предприятий, численности трудящихся и т. п.), то используется инвариантный анализ — частный случай структурного анализа. Напомним, что в математике под инвариантностью понимается любая функция, число или свойства, не изменяющиеся при определенных преобразованиях [148].

Для автономной разработки оценок исследуемых процессов на перспективу, которые позволили бы осуществить обратные расчеты и интерполяцию, как указывалось выше, могут использоваться анализы предельных (процессы насыщения) и пороговых (процессы замещения) значений.

Для анализа процессов насыщения часто используется семейство логистических кривых (рис. 2.1). Уравнение логистических кривых имеет вид

$$y = \frac{a}{1 + b\,e^{-cx}}, \tag{2.50}$$

где $a$ — предельное значение — величина насыщения; $b$, $c$ — постоянные коэффициенты; $x$ — аргумент. Точки перегиба этой функции $x = \ln b/c$; $y = a/2$. Функция абсолютного роста, как указывалось выше, представляет собой первую производную. Следовательно, для логистической функции

$$y' = \frac{bc}{a}\,e^{-cx}\,y^2. \tag{2.51}$$

Функция относительного роста не зависит от предельной величины насыщения

$$\frac{y'}{y} = \frac{bc}{a}\,e^{-cx}\,y = \frac{c}{1 + \frac{1}{b}\,e^{cx}}. \tag{2.52}$$

Функция эластичности

$$x\,\frac{y'}{y} = \frac{cx}{1 + \frac{1}{b}\,e^{cx}}. \tag{2.53}$$

Логистическая кривая обладает замечательным свойством достаточно точно описывать целый ряд сложных экономических, демографических и технологических процессов. Например, в [43] приводятся логистические кривые, показывающие рост населения земного шара за период с 1650 г. по 1950 г., увеличение скорости пе-

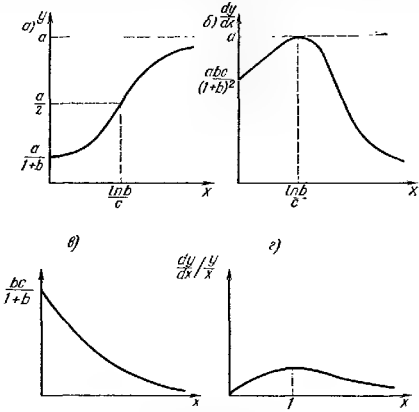



Рис. 2 1 Логистическая функция:
*а)* функция; *б)* абсолютный рост; *в)* относительный рост; *г)* эластичность

редвижения транспортных средств, используемых человечеством (1810—1950 гг.), рост числа телефонных аппаратов (1880—1955 гг.) и т. д. Результаты определения требуемого уровня и периода насыщения по логистической кривой тем грубее, чем меньше отрезок кривой, выбранный для анализа. Они весьма чувствительны даже к самым незначительным изменениям исходных данных. Качество расчетов повысится, если задана величина насыщения $a$, а фактическое развитие позволяет определить с высокой степенью достоверности период, в течение которого достигается величина насыщения $a/2$.

Процессы насыщения, которые представляют собой ряд последовательных превращений, направленных на постепенную замену существующих методов решения различных проблем, математически отображаются в виде определенной последовательности ряда так называемых экологических функций. Название этой функции связано с тем, что она поразительно точно описывает процессы биологического развития.

Экологическая функция, выражающая продолжительность «жизни» технических средств, технологических процессов, различных методов и т. д., имеет следующий вид:

$$y = a\overline{e}^{c^2 (x \quad b)^2}, \tag{2.54}$$

где $a$ — наибольшее значение функции; $b$ — значение аргумента, соответствующее наибольшему значению функции; $c$ — постоянная, характеризующая среднее квадратическое отклонение.

Функция абсолютного роста — первая производная экологической функции — может быть представлена следующим образом:

$$y' = 2c^4 (x - b)^3 y, \tag{2.55}$$

функция относительного роста:

$$\frac{y'}{y} = 2c^4 (x \quad -b)^3 \tag{2.56}$$

и, наконец, функция эластичности:

$$y' \frac{x}{y} - 2c^4 (x - b)^3 x. \tag{2.57}$$

Графики экологической функции, а также функций абсолютного, относительного роста и эластичности приведены на рис. 2.2.

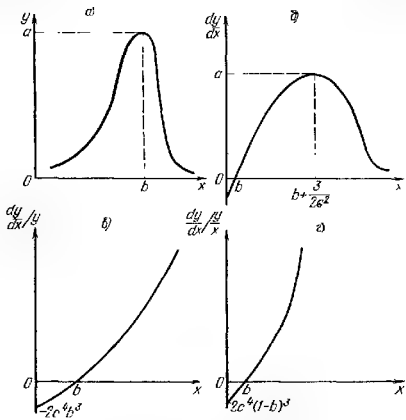



Рис. 2.2. Экологическая функция:
*а)* фучкция; *б)* абсолютный рост; *в)* относительный рост; *г)* эластичность

Изучение последовательностей следования, «родственных» экологических функций, описывающих временну́ю последовательность причинно взаимосвязанных процессов, позволяет, в частности, установить новые пороговые значения моменты появления принципиально новых технологических процессов, видов аппаратуры, научных методов. Конкретный вид одной функции дает возможность установить продолжительность жизни данного процесса. Это возможно лишь в том случае, если для расчетов используются данные прошлого периода, продолжительность которого равна как минимум одной трети или половине продолжительности ожидаемого срока службы. И, наконец, третий путь использования экологических функций заключается в возможности эмпирического анализа большого количества процессов роста и выбора на этой основе наиболее типичных для определенных областей значений параметров *a*, *b* и *c*.

Кроме описанных, для целей прогнозирования применяется и стратегический анализ, который учитывает диалектическое развитие рассматриваемого процесса. Математический аппарат стратегического анализа составляет теория игр.

*Анализ результатов прогнозирования.* Полученные результаты прогноза должны пройти объективную и субъективную проверку. С этой целью прибегают к независимой разработке одного прогноза двумя или несколькими группами лиц, к разработке одного прогноза разными методами, методу контрольного опроса (метод мнений, метод «Дельфа») и, наконец, к определению надежности и допусков разработанных прогнозов известными и подробно описанными выше методами математической статистики. При этом под надежностью прогноза понимается вероятность наступления предсказываемого события в пределах установленных допусков при осуществлении заданного комплекса условий. Следовательно, понятия надежности и допусков прогноза оказываются увязанными в единое целое. Вывод о возможности использования того или иного прогноза делается исходя из степени совпадения результатов, полученных разными методами и разными группами людей, а также исходя из надежности прогноза.

В простейшем случае допуски прогноза могут быть приняты равными доверительным интервалам, определенным известными методами математической статистики, приложенными к базисному временно́му ряду. Однако статистическая область допусков не учитывает ни ошибки прогностических расчетов, ни дополнительную неопределенность, причиной которой является изменение условий формирования показателей надежности. Поэтому область допусков будущего развития не может быть определена лишь путем экстраполяции соответствующих параметров базисного временно́го ряда. Вследствие этого целесообразно использовать те эмпирические оценки прогностических допусков, динамика которых находится в тесной связи с динамикой показателей предельных значений рассматриваемых факторов.

В более общем виде выводы о надежности прогностических оценок можно получить, если предположить, исходя из содержания рассматриваемой проблемы, наличие определенного теоретического распределения. Для оценки надежности прогноза используются также и методы регрессионого анализа.

Значительно сложнее обстоит дело с определением надежности и допусков в стратегических, игровых и неопределенных ситуациях. Здесь в основном применяется аппарат теории игр

Изложенные в данном разделе сведения могут быть использованы при составлении перспективных прогнозов, необходимых для разработки генеральных схем развития систем производственной связи отраслей, подотраслей и крупных промышленных предприятий, основных положений, технико-экономических обоснований, а также для определения технической политики при создании новой аппаратуры. Краткосрочные прогнозы развития систем производственной связи можно осуществлять и на стадии технического проекта, положив их в основу для определения объемных показателей проектируемого объекта (емкость ПАТС и сети линейных сооружений, количество установок различных сетей связи и т. д.).

## 2.5. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Важнейшие задачи синтеза систем производственной связи могут быть решены методами линейного и динамического программирования, теории графов и теории игр — сравнительно «новых» и развивающихся разделов математики. Возможности этих методов применительно к вопросам производственной связи еще полностью не выяснены и можно только ожидать значительных результатов от использования их в задачах районирования и узлообразования сетей автоматических телефонных станций, выбора оптимального соотношения между различными сетями производственной связи, построения сетей линейных сооружений, определения состава абонентов для включения в диспетчерские телефонные коммутаторы и т. д. Поскольку перечисленные задачи находятся сейчас только в стадии постановки или позволяют излагать полученные первые результаты в терминах других разделов математики, здесь не дается изложения существа, методов и результатов ни линейного программирования [9, 39, 182 и др.], ни теории графов [15, 34, 68, 100, 110, 158 и др.], ни теории игр. [16, 39, 49, 95, 114, 116 и др].

В данном разделе рассматриваются первоначальные сведения о методах динамического программирования.

Динамическое программирование — раздел математики, занимающейся вопросами оптимального многошагового управления (поведения). Оптимальным управлением называется последовательность действий, направленных на достижение некоторой числовой характеристикой управляемого процесса (целевой функции) экстремального (наибольшего или наименьшего) значе-

ния. Многошаговость означает, что указанные действия производятся итерациями, последовательными шагами, соответствующими либо различным моментам времени, либо многоступенчатой структуре процесса. Примерами задач, к которым может быть применен метод динамического программирования, в области производственной связи являются следующие:

1. Заданы рельеф местности и трасса проектируемого бронированного кабеля или телефонной канализации. Требуется выбрать профиль прокладки, при котором затраты на строительство были бы минимальными.

2. Задано размещение абонентов по территории предприятия и местоположение телефонной станции. Требуется составить такую схему линейных сооружений, при которой затраты на их строительство и обслуживание были бы минимальными.

3. Заданы основные параметры системы прямой телефонной связи. Требуется найти количество установок на каждом уровне управления с тем, чтобы при известных затратах оперативность связи была бы наибольшей.

4. Задано размещение абонентов по территории предприятия. Необходимо определить такое количество телефонных станций, чтобы затраты были бы минимальны (задача районирования).

5. Заданы параметры надежности аппаратуры или ее элементов. Необходимо установить объем резервирования для достижения оптимальных условий.

Перечень таких задач может быть продолжен. Как правило, явное решение их с помощью динамического программирования чрезвычайно громоздко. Поэтому здесь основное внимание уделяется методам численного решения, а также изучению свойств и структуры решения, которые могли бы быть использованы для сокращения вычислений. В разд. 8.3 будут рассмотрены пути сокращения объема вычислений при решении задач узлообразования.

Трудность задач многошагового управления объясняется тем, что в них требуется определить большое число взаимосвязанных параметров. На этапе постановки задачи делаются попытки свести общую сложную задачу к большому числу значительно более простых экстремальных задач. Наиболее успешно для этих целей применяется принцип оптимальности управления, сформулированный Р. Беллманом [3, 11, 12]: если управление процессом является оптимальным, то оно будет оптимальным и для процесса, остающегося после осуществления первого шага.

Пусть имеется процесс, в котором управление производится в дискретные моменты времени 0, 1, ..., $n$, и пусть $x_k$ — состояние процесса в момент времени $k$. Управление процессом заключается в том, что на каждом шаге выбирается параметр управления $y_k$ и процесс переходит в новое состояние $x_{k+1}$, функционально зависящее от $x_k$ и $y_k$, т. е. $x_{k+1}=f(y_k, x_k)$. Нужно выбрать управление, которое оптимизирует значение целевой функции процесса, зависящей от последовательности изменяемых со-

стояний $x_0$, $x_1$, ..., $x_n$ процесса, определяемой начальным состоянием $x_0$ и выбором параметра управления $y_k$ на каждом шаге. Пусть целевая функция

$$C(N_0,\ N_1\ N_2,\ \cdot\ \cdot\ \cdot,\ N_k) = \sum_n c_n(x_n,\ y_n) \tag{2.58}$$

и функции $f_k(x_k)$ определены условием

$$f_k(x_k)\ \ \min \sum_{n=k} c_n(x_n,\ y_n), \tag{2.58'}$$

где минимум берется при фиксированном значении $x_k$ по всем возможным последовательностям управляющих параметров.

Основное уравнение Беллмана в этих обозначениях имеет следующий вид:

$$f_k(x_k) = \min_{y_k}[c_k(x_k,\ y_k) + f_{k+1}(x_{k+1})]. \tag{2.59}$$

Суть метода динамического программирования заключается в том, что сначала определяются все функции $f_k(x_k)$, а затем последовательно находятся из основного уравнения параметры управления $y_0$, $y_1$ ... Отыскание функций $f_k(x_k)$ может выполняться итерационным методом. Для процесса с конечным числом шагов основное уравнение позволяет находить искомые функции, начиная с последней $f_n(x_n)$, $f_{n-1}(x_{n-1})$, ..., $f_0(x_0)$. При этом последнее состояние $x_n$ процесса может быть заранее задано.

Рассмотрим применение метода динамического программирования к задачам оптимального резервирования [160]. Допустим, требуется найти такое количество резервных элементов для каждой подсистемы, при котором требуемый показатель надежности системы в целом обеспечивался бы при минимальных суммарных затратах на все резервные элементы. Основное уравнение Беллмана при этом примет вид

$$f_n(q_0)\ \ \min\left[c_n x_n + f_{n-1}\left|\frac{q_0}{q_n(x_n)}\right|\right]$$

$$g_n(x_n) \geqslant q_0,\quad x_n = 0,\ 1,\ 2\ldots,$$

где $q_0$ — требуемое значение показателя надежности системы; $q_n(x_n)$ — показатель надежности $n$-й подсистемы; $x_n$ — количество резервных элементов $n$-й подсистемы; $c_n$ — стоимость одного элемента $n$-го типа.

Путь решения этой задачи следующий:

1. Находятся оптимальные двумерные векторы состава системы для 1 и 2-го элементов при всех значениях показателя надежности, не меньших $q_0$.

2. Находятся оптимальные трехмерные векторы состава системы для 3-го элемента и соответствующих оптимальных пар $(x_1, x_2)$ при всех значениях показателя надежности, не меньших $q_0$.

3. Подобный процесс продолжается до тех пор, пока не будет найден оптимальный $n$-мерный вектор состава системы для $n$-го элемента и соответствующего оптимального вектора $(x_1, x_2, \ldots, x_{n-1})$ при значении показателя надежности, равного $q_0$.

4. Находится оптимальное значение $x_n$ и соответствующий оптимальный вектор $(x_1, x_2, \ldots, x_{n-1})$, которые в совокупности и дают оптимальное решение.

Проиллюстрируем данный алгоритм численным примером. В системе две подсистемы, каждая из которых представляет собой одиночный элемент. Надежность этих элементов повышается нагруженным резервированием. Показатели надежности соответственно равны $q_1=0{,}7$; $q_2=0{,}5$. Задано, что вероятность безотказной работы всей системы $q_0$ не должна быть меньше 0.98. Вычислим значения показателя надежности каждой из подсистем при разном числе резервных элементов: $q_i(x_i)=1-(1-q_i)^{x_i+1}$. Результаты сведем в табл. 2.6.

Таблица 2.6

ВЕЛИЧИНЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДВУХ СИСТЕМ

| Количество резервных элементов, $x_1$, $x_2$ | $q_1(x_1)$ | $q_2(x_2)$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,7 | 0,5 |
| 1 | 0,91 | 0,75 |
| 2 | 0,973 | 0,875 |
| 3 | 0,9919 | 0,9375 |
| 4 | 0,9976 | 0,9687 |
| 5 | 0,9993 | 0,9844 |
| 6 | 0,9998 | 0,9922 |
| 7 | 0,9999 | 0,9961 |

По табл. 2.6 находится первое значение $q_2(x_2)$, большее $q_0=0{,}98$. Оно равно 5. Затем определяется такое $q_1(x_1)$, которое превышает величину $\frac{q_0}{q_2(x_2)}$. Соответствующее значение заносится в табл. 2.7. Подсчитывается суммарная стоимость резервных элементов, исходя из того, что $c_1=1$ и $c_2=3$. Далее принимается следующее значение $q_2(x_2+1)=5+1=6$ и процедура продолжается.

Из табл. 2.7 видно, что все последующие значения наборов $(x_1, x_2)$ будут давать большие значения суммарной стоимости. Следовательно, оптимальный набор — $x_1=4$; $x_2=5$.

Таблица 2.7

ДАННЫЕ РАСЧЕТА СОСТАВА СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

| $x_2$ | $q_2(x_2)$ | $\frac{q_0}{q_2(x_2)}$ | $x_1$ | $q_1(x_1)$ | $c(x)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0,9844 | 0,9956 | 4 | 0,9976 | 19 |
| 6 | 0,9922 | 0,9878 | 3 | 0,9919 | 21 |
| 7 | 0,9961 | 0,9839 | 3 | 0,9919 | 24 |
| . | . . . | . . . | . | . . . | . . . |
| . | . . . | . . . | . . . | . . . | . . . |
| . | . . . | . . . | . . . | . . . | . . . |

Метод динамического программирования применим и для решения обратной задачи оптимального резервирования, когда требуется найти такое количество резервных элементов для каждой

подсистемы, чтобы при заданных допустимых затратах на систему в целом обеспечивался максимально возможный показатель надежности системы. Обозначим заданное ограничение на стоимость системы через $c_0$. Тогда основное уравнение запишется следующим образом:

$$f_n(c_0) = \max q_n(x_n) f_{n-1}(c_0 - c_n x_n).$$

$$0 \leqslant c_n x_n \leqslant c_0.$$

$$x_n = 0,\ 1,\ 2\ldots$$

Порядок решения этой задачи принципиально не отличается от порядка решения предыдущей задачи.

На идеях динамического программирования основаны также некоторые алгоритмы решения задач транспортных сетей. Два таких алгоритма описаны в [39]: алгоритм Беллмана—Шимбелла для отыскания оптимальных маршрутов между любыми двумя пунктами сети и алгоритм Минти для отыскания оптимальных маршрутов между фиксированным пунктом сети и всеми другими ее пунктами. Алгоритм Беллмана—Шимбелла исходит из предположения, что стоимость участка сети может быть принята пропорциональной длине участка, и используется при решении некоторых задач узлообразования. Алгоритм Минти применяется при синтезе оптимальной схемы линейных сооружений на нерайонированных телефонных сетях.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# *Организация и функционирование систем производственной связи*

## 3.1. СОСТАВ, СТРУКТУРА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

Производственная связь подобно учрежденческой обслуживает ограниченный, замкнутый, круг абонентов и использует близкую ей номенклатуру технических средств (особенно в части АТС и директорской телефонной связи). Однако производственная связь значительно шире по своему составу, чем учрежденческая, включает большее количество средств, требует организации самостоятельного, весьма специфического обслуживания аппаратуры.

Рассматривая систему производственной связи как физическую систему, можно выделить следующие ее подсистемы: 1) станционные устройства; 2) линейные сооружения; 3) абонентские пункты; 4) устройства электропитания; 5) гражданские сооружения. При этом три первых подсистемы являются основными, т. е. обеспечивающими прохождение технологического процесса — установления соединения и передачи информации. Устройства электропитания и гражданские сооружения непосредственно в технологическом процессе не участвуют, но без них осуществление данного процесса становится невозможным.

Станционные устройства, линейные сооружения и абонентские пункты, в свою очередь, могут быть разделены на более мелкие подсистемы. Например: станционные устройства используются для междугородной или местной связи; соединение может устанавливаться либо по жестко закрепленным за абонентами линиям, либо по линиям, предоставляемым в пользование абонентам только на время соединения и передачи информации; требуемые абоненты могут выделяться из общего числа абонентов либо группами, либо персонально с помощью избирательного вызова. Линейные сооружения могут быть проводными, радио либо радиорелейными; проводные каналы могут быть организованы по воздушной или по кабельной (симметричной, коаксиальной) магистрали и т. д. Абонентские пункты телефонной связи различаются по способу выбора

требуемых абонентов (номеронабиратель, тастатура, ключ, кнопка и т. п.), способу вызова абонентов (звонок, голос, лампа и т. п.), способу передачи и приема речевой информации (на телефон, громкоговоритель) и др. Аналогично могут быть классифицированы и абонентские устройства других видов связи.

Классификация систем по перечисленным выше пяти признакам является весьма распространенной и удобной при изучении отдельных разделов электросвязи. Однако она непригодна в тех случаях, когда необходимо проследить весь процесс доставки информации — от момента ее возникновения до адресата.

Классификация, построенная на основе анализа процесса доставки информации, позволит составить математическую модель данного процесса. Поэтому система связи должна быть разделена на такие составные части, которые могут самостоятельно функционировать, осуществляя доставку информации. Это разделение может быть сделано: а) по уровням производства; б) на одном уровне производства. В первом случае оказывается, что каждая система связи данного уровня производства является составной частью (подсистемой) системы связи вышестоящего уровня производства. В качестве примера на рис. 3.1 приведена структура системы связи строительства крупного города. Как видно, в состав системы связи Главка входят некоторые общие для всех составных частей системы элементы (станции абонентского телеграфа АТА, производственные АТС, узел радиотелефонной связи, линейные сооружения), а также системы связи центрального аппарата Главка и подчиненных ему трестов.

Системы связи на одном (любом) уровне производства могут быть разделены на виды и сети связи.

Видами связи обычно называют совокупность технических средств, предназначенных для передачи информации, имеющей одну форму восприятия. Например, для передачи речевой информации существует телефонная связь, включающая в себя также радиотелефонную связь, громкоговорящее оповещение и т. д. Кроме того, имеется телеграфная и фототелеграфная связи, промышленное телевидение, телекодовая связь (связь с ЭВМ), а также различная сигнализация.

Понятие вида связи достаточно широкое и использовать его в качестве основы для математического описания конкретных процессов доставки информации удается только в тех случаях, когда вид связи не может быть разделен на подсистемы, осуществляющие автономную передачу информации (например, если на рассматриваемом уровне производства функционирует только один локальный комплекс устройств связи данного вида). Однако, как правило, на промышленных предприятиях и в его структурных подразделениях используется по нескольку локальных комплексов телефонной связи. Иногда на одном уровне производства имеется несколько комплексов производственной связи. Вследствие этого вводится понятие сети связи как подсистемы вида связи.

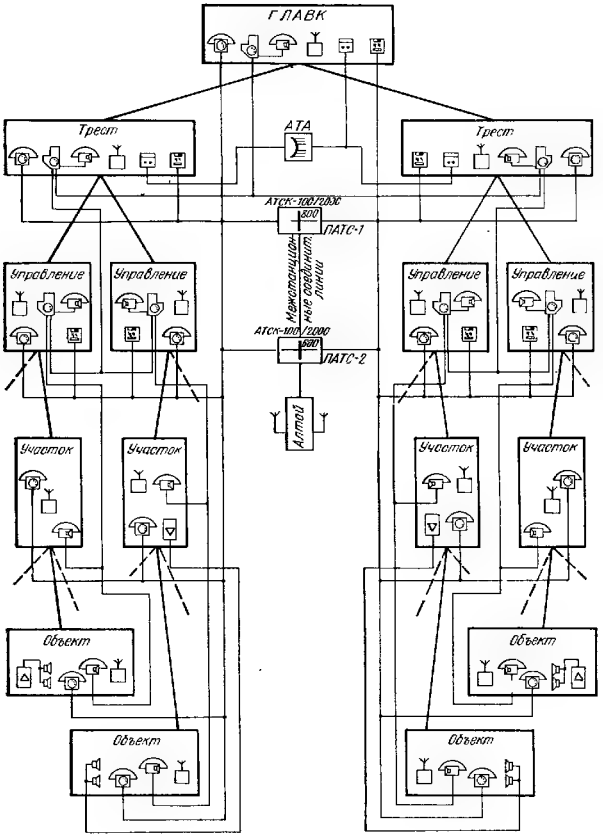



Рис. 3.1. Структура системы связи строительства крупного города

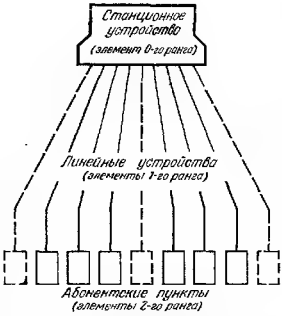


Рис. 3.2. Общая структура сети связи

Сетью связи называется относительно автономный комплекс устройств, обеспечивающих доставку информации, имеющей одну форму восприятия, по адресам среди заданного круга абонентов. Сеть связи — это минимальный уровень системы связи, так как образующие ее элементы уже не могут выполнять самостоятельных задач по передаче информации.

Структура любой сети связи может быть выражена схемой, представленной на рис. 3.2. Таким образом, сеть связи является ветвящейся системой второго порядка, причем станционное устройство является элементом нулевого ранга, а линии и абонентские пункты — соответственно элементами первого и второго ранга. В табл. 3.1 приводятся данные о номенклатуре технических средств различных сетей производственной связи. В таблицу включены станционные устройства, наиболее широко используемые на промышленных предприятиях, в строительстве и на транспорте. Основные технические данные и стоимостные показатели этих устройств будут приведены в гл. 5.

## 3.2. ВХОДЯЩИЙ ПОТОК ВЫЗОВОВ И ВРЕМЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ

*Общие положения.* Рассмотренная структура сетей производственной связи позволяет перейти к выбору соответствующей математической модели, описывающей механизм ее функционирования. Потоком вызовов, поступающих на вход сети связи, является информация, циркулирующая на данном уровне управления, причем, поскольку речь идет о конкретной сети связи, рассматривается не весь объем сообщений, а только та его часть, которая предназначена для передачи по данной сети.

Документированная информация создает нагрузку на сети неэлектрической, телеграфной и фототелеграфной связи, а также на сети передачи данных. Некоторые характеристики потока этого вида информации рассматривались в гл. 1. Недокументированная информация в основном передается по сетям телефонной связи, а также путем личного общения работников между собой и по сети промышленного телевидения. Информация, передаваемая путем личного общения работников между собой, нагрузки на сооружения связи не создает. Количественные характеристики потоков недокументированной информации, поступающих на вход сетей про-

Таблица 3.1

НОМЕНКЛАТУРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

| Наименование систем, станций, комплектов аппаратуры, коммутаторов, установок | Тип | Назначение и область применения |
|---|---|---|
| Координатная сельская автоматическая телефонная станция | АТС К-50/200 | Организация учрежденческой телефонной связи в небольших учреждениях, конторах, институтах; производственной связи на небольших промышленных предприятиях, в колхозах и совхозах |
| Координатная учрежденческая и производственная автоматическая телефонная станция | УПАТС-100/400, УПАТС-50/200 | |
| Декадно-шаговая учрежденческая автоматическая телефонная станция | УАТС-49 | Организация учрежденческой телефонной связи в крупных учреждениях и производственной связи на средних промышленных предприятиях, а также в сельской местности |
| Координатная учрежденческая и сельская автоматическая телефонная станция | АТС К-100/2000 | |
| Координатная автоматическая телефонная станция | АТСК | Организация производственной связи на крупных промышленных предприятиях |
| Телефонный комплект местной связи | ТКМС | Организация диспетчерской и директорской связи в учреждениях, на промышленных предприятиях и стройках при числе абонентов до 6 |
| Коммутатор директорской | КД-6 | |
| Коммутатор оперативной связи | КОС-22М | То же, при числе абонентов до 20 |
| Установка «начальник — секретарь» | УНС-20 | » |
| Шахтная станция | ШИС | » |
| Коммутатор директорской связи | КД-18 | » |
| Коммутатор с 1, 2 или 3 пультами управления | «Псков» | » |
| Станция диспетчерской связи | СДС М-50/100 | То же, при числе абонентов свыше 20 |
| Комплект аппаратуры станционной связи | КЛСС-53 | » |
| Станция диспетчерской телефонной связи для энергосетей | ЭДТС-66 | » |
| Станция административной связи | САС-40, «Темп-40» | » |
| Коммутаторы директорской связи | КД-36, КД-60, КД-120 | » |
| Установка диспетчерской и директорской связи | «Кристалл» | » |

*Продолжение*

| Наименование систем, станций, комплектов аппаратуры, коммутаторов, установок | Тип | Назначение и область применения |
|---|---|---|
| Автоматизированная система связи с подвижными объектами | «Алтай» | Организация радиотелефонной связи с подвижными абонентами в радиусе 30 км |
| Радиостанции прямой радиотелефонной связи с диапазонам частот, МГц: | | |
| 33÷46 | «Марс» (42Р1, 33Р1), «Дистанция» (40Р1, 08Р1, 09Р1, 10Р1), «Гранит» | То же |
| 148÷174 | «Марс» (43Р3, 28Р3), | » |
| 130÷174 | «Пальма» | » |
| То же, для связи с локомативами | ЖР-3М, ЖР-5М | То же, на железнодорожном транспорте в раднусе 15 км и более |
| Радиостанцни носимые | «Стройка», 61Р1, 60Р1, 58Р1, 27Р1, 24Р1 | Организация радиотелефонной связи в радиусе до 4 км |
| Системы производственной громкоговорящей связи с абонентскими усилителями, циркулярные | ПГС-1К, ПГСПЗ-120, ГСШ | Организация громкоговорящей связи на промышленных предприятиях |
| То же, избирательные | ПГСИ-10, ПГСИ-30 | То же |
| Переговорные устройства | ПУ-1, ОПУ-10, «Эхо» | » |
| Усилитель мощности | УМ-50А | » |
| Трансляционные узлы | ТУ-50М, ТУ-100М, ТУ-600, ТУ-5-4 | » |
| Автобусная громкоговорящая установка | АГУ-10 | » |
| Электромегафои | ЭПМ-2 | » |
| Система телефонной и громкоговорящей связи | «Березка» | Организация комплексной телефонной и громкоговорящей связи на кораблях и промышленных предприятиях |
| Промышленные телевизионные установки с одной видиконной камерой | ПТУ-26, ПТУ-27, ПТУ-22 | Организация диспетчерского и технологического визуального контроля |
| То же, с 5 видиконными камерами | ПТУ-23 | То же |
| То же, с 10 видиконными камерами | ПТУ-24 | » |
| Промышленные телевизионные установки с одной суперортиконной камерой | ПТУ-105 | » |

*Продолжение*

| Наименование систем, станций, комплектов аппаратуры, коммутаторов, установок | Тип | Назначение и область применения |
|---|---|---|
| То же, с 6 суперортиконными камерами | ПТУ-102, ПТУ-106 | Организация диспетчерского к технического визуального контроля |
| То же, с 12 суперортиконными камерами | ПТУ-103 | То же |
| Промышленные телевизионные установки с видиконными камерами унифицированные | ПТУ-28, ПТУ-29, ПТУ-30, ПТУ-31 | » |
| Станция прямой диспетчерской связи | СПД-59 | Организация связи совещаний на железнодорожном транспорте |
| Станции магистральной связи совещаний | МСС | То же |
| Станции распорядительной диспетчерской телефонной связи | РСДТ-61 | » |

изводственной связи, могут быть получены путем организации соответствующих статистических исследований, как правило, с применением различных счетчиков числа вызовов и других приборов. В некоторых сетях (радио, производственная громкоговорящая с центральными усилителями и т. д.) необходимые статистические данные могут быть получены по записям числа переданных и принятых радиограмм, циркулярных передач и т. д., которые делают операторы в дежурных (сменных) журналах.

Поток вызовов (объем сообщений) может быть как детерминированным, так и случайным, т. е. количественные характеристики этого потока в заданные моменты времени могут иметь либо определенные, заранее известные, либо случайные значения. Если детерминированный поток вызовов поступает в систему связи, пропускная способность которой постоянна, то расчет такой системы сводится к установлению требуемого числа обслуживающих аппаратов путем деления количественной характеристики потока за рассматриваемый отрезок времени на пропускную способность за тот же отрезок. Фактически установленное число аппаратов будет определять качество функционирования такой системы: если оно меньше расчетного, то часть вызовов (сообщений) задерживается в обслуживании до момента освобождения того или иного аппарата; если оно больше расчетного, то задержанных вызовов (сообщений) не будет, но лишние аппараты в обслуживании участия не принимают (простаивают). При этом точно известно, какие вызовы и насколько будут задержаны в первом случае, какие аппараты и сколько времени будут простаивать — во втором.

Другая картина имеет место, когда входящий поток вызовов и пропускная способность системы связи являются случайными

величинами. В этом случае и количественные характеристики потока и качественные характеристики всей системы связи за рассматриваемый отрезок времени (длина очереди, продолжительность простоев, ожидания начала обслуживания и т. д.) не могут быть определены точно и указываются с соответствующими вероятностями. Именно такое положение складывается для большинства сетей производственной связи. Поэтому для них наилучшим приближением с точки зрения математического описания является модель массового обслуживания (см. разд. 2.1).

*Входящий поток.* Рассмотрим возможность применения аппарата теории массового обслуживания, разработанного для простейшего потока, к входящему потоку на сети производственной связи. Для этого входящий поток должен, как указывалось выше, быть стационарным, без последействия, ординарным. На рис. 1.4 показана колеблемость документированной информации за один месяц. Из рисунка следует, что разница между количествами документов, поступающих в разные дни, может быть очень велика. Это свидетельствует об отсутствии стационарности потока документированной информации в целом за месяц в той организации, в которой была получена статистика, представленная на рис. 1.4. Колеблемость недокументированной информации (например, числа вызовов, поступающих на АТС в сутки) выражена еще более резко. Таким образом, поток поступления заявок на обслуживание (сообщений, вызовов и т. д.) как документированной, так и недокументированной информации не обладает свойством стационарности.

Вследствие отсутствия стационарности входящего потока в целом при рассмотрении его за значительный отрезок времени из указанного отрезка выбирают такой промежуток времени, в течение которого поток имеет наибольшее значение. Этот промежуток называется периодом наибольшей нагрузки – месяцы, дни, часы наибольшей нагрузки. В частности, по определению МККТТ, часом наибольшей нагрузки (чнн) называется период из следующих друг за другом 60 мин, в течение которого средняя интенсивность нагрузки является наибольшей. В качестве примера на рис. 3.3 приводится гистограмма [1]) распределения моментов возникновения чнн в течение рабочего дня, полученная по данным статистики, собранной в строительных организациях г. Ташкента в 1966 г.

Как показали многочисленные исследования, с достаточной степенью точности можно принять, что в периоды наибольшей нагрузки входящий поток требований, поступающий на сеть связи, является стационарным. Также можно считать стационарными по-

---

[1]) Гистограммой называется оценка плотности вероятностей $p(t)=dF(t)/dt$, построенная по данным имеющейся статистики. По оси абсцисс откладывается величина $t$, а по оси ординат — величины $p_i=n_i/N$, где $N$ — общее количество измерений; $n_i$ — количество измерений, давших соответствующий результат за отрезок $t_i$.

токи в периоды не наибольшей нагрузки, но интенсивность их будет меньше.

Таким образом, разбивая отрезки времени, в течение которых входящий поток требований не является стационарным, на более

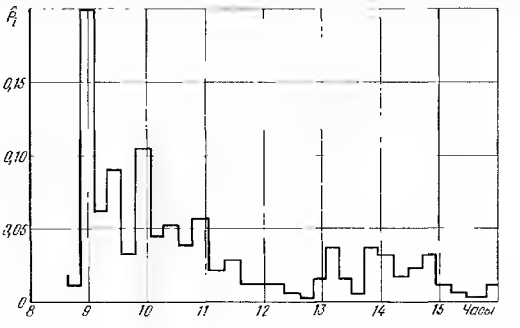



Рис. 3.3. Гистограмма распределения моментов возникновения чпи в течение рабочего дня

мелкие отрезки, можно получить стационарный процесс с различными значениями интенсивности потоков.

Если система связи эксплуатируется с неограниченным ожиданием, то можно считать, что входящий поток требований не обладает последействием, так как в данном случае каждый вызов рано или поздно будет обслужен и поэтому не является причиной возникновения других вызовов. Разумеется, каждый вызов имеет какие-то последствия, связанные с поведением людей — вызывает их перемещения, заставляет вести различные переговоры, в том числе и по телефону. Однако, поскольку содержательная сторона механизма возникновения вызовов не рассматривается, принято считать каждый новый вызов как независимое случайное событие. Другое дело, если поступивший вызов получит отказ в соединении (например, сигнал «занято») или время ожидания соединения превысит какой-то допустимый предел. Тогда абоненты, как правило, пытаются снова установить соединение, создавая вторичный поток так называемых повторных вызовов. При этом вероятность появления повторного вызова определенным образом связана с вероятностью отказа в соединении первичного вызова. В свою очередь, вследствие повторных вызовов увеличиваются нагрузка и вероятность отказа. Суммарный поток, таким образом, обладает последействием, т. е. не является простейшим. Поэтому только в одном частном случае (система с неограниченным ожиданием) можно принять предположение о простейшем входящем на сети производ-

ственной связи потоке. В остальных случаях принятие данной гипотезы является приближением, причем чем выше вероятность отказа, тем это приближение грубее.

Наконец, рассмотрим ординарность потока, входящего на сети производственной связи. В общем случае предположение об ординарности потока также не может быть принято, поскольку на телефонную станцию одновременно может поступить несколько вызовов, на телеграф могут принести сразу пачку телеграмм, на радиостанцию несколько радиотелеграмм и т. д. Следовательно, принимая входящий поток ординарным, мы также делаем приближение, причем чем больше вероятность одновременного поступления двух и большего количества вызовов (сообщений), тем это приближение грубее.

Таким образом, допущение о простейшем входящем на сети производственной связи потоке всегда связано с ошибками приближения, величина которых может быть оценена только путем соответствующей обработки данных статистических исследований, проведенных на той или иной сети.

Рассмотрим некоторые примеры такой обработки, которые позволяют сделать количественно определенными положения, изложенные выше, и помогут при проведении статистических исследований в тех случаях, когда необходимо знание закона распределения входящего потока вызовов.

*Промежутки между соседними вызовами.* Выше (см. гл. 2) было показано, что если входящий поток вызовов простейший, то распределение промежутков времени между соседними вызовами должно подчиняться экспоненциальному распределению, т. е. вероятность того, что за время $t$ не поступит ни одного вызова, определяется ф-лой (2.4). Поэтому вероятность того, что случайная величина промежутка времени между соседними вызовами будет меньше $t$, подчиняется показательному закону распределения, выражаемому формулой

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \qquad (2.8'')$$

где $\lambda$ - интенсивность вызовов простейшего потока.

В качестве примера на рис. 3.4 приводятся графики эмпирической и теоретической (2.8″) функций распределения случайной величины промежутков между соседними вызовами с телефонного аппарата АТС [93]. Эмпирическая функция получена по данным собранной статистики в ряде строительных организаций (6603 наблюдения). Проверка гипотезы о соответствии опытных данных закону (2.8″) проводится по критерию Пирсона ($\chi^2$). Упорядоченные данные статистики рассматриваемого примера, расчет величины математического ожидания случайной величины по данным выборки и проверка гипотезы приводятся в табл. 3.2.

Математическое ожидание случайной величины продолжительности промежутка между вызовами определяется как

$$\overline{t} = \sum_{i=1}^{n} \frac{t^{(i)} + t^{(i+1)}}{2} \wedge_i, \text{ с}, \qquad (3.1)$$

где $n$ — число интервалов, в которых находятся результаты статистических наблюдений (в данном случае $n=16$; деление имеющейся статистики по интервалам производилось с учетом того, чтобы было обеспечено соотношение $n \leqslant 20$); $t^{(i)}$, $t^{(i+1)}$ — границы интервалов; $\hat{p}_i$ — частость $i$-го интервала.

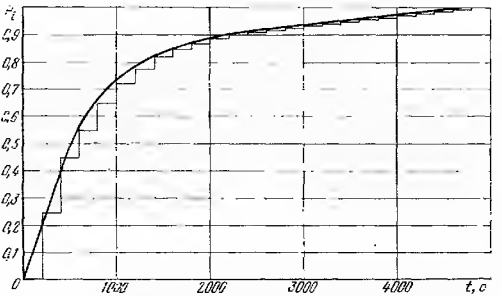



Рис. 3.4. Эмпирическая и теоретическая функции распределения случайной величины промежутков между соседними вызовами с телефонного аппарата АТС

Суммирование по ф-ле (3.1) дает $\bar{t}=809{,}6$ с, что соответствует интенсивности потока

$$\lambda = \frac{1}{809{,}6} = 0{,}001235 \text{ выз}\cdot\text{с}^{-1}$$

или $\lambda=0{,}001235\cdot 3600 \approx 4{,}5$ выз$\cdot$ч$^{-1}$.

Теоретические вероятности определяются по формуле

$$p_i = \int_{t^{(i)}}^{t^{(i+1)}} \lambda\, e^{-\lambda t}\, dt = e^{-\lambda t^{(i)}} - e^{-\lambda t^{(i+1)}}. \qquad (3.1')$$

Величина $\chi^2$ по данным табл. 3.2, равна: $\chi^2 \approx 6603 \sum_{i=1}^{n=16} \frac{(\hat{p}_i - p_i)^2}{p_i}$: $\chi^2 \approx 6603 \times$ $\times 5{,}984\cdot 10^{-4} \approx 3{,}95$.

При 16—2=14 степенях свободы по таблицам распределения $\chi^2$ [70] определяется, что с вероятностью более чем 0,99 рассматриваемая случайная величина подчинена по закону распределения (2.8″).

Так как случайная величина промежутков между соседними вызовами является непрерывной, то гипотеза может быть проверена и по критерию А. Н. Колмогорова. Проверка выполняется в следующем порядке:

1) строятся графики эмпирической и теоретической функций распределения (см. рис. 3.4);

2) определяется максимум $D$ модуля разности между ними (на рис. 3.4 $D=0{,}002$);

3) определяется величина

$$y = D\sqrt{n}. \qquad (3.2)$$

В рассматриваемом примере $y=0{,}002\sqrt{6603}=0{,}002\cdot 81{,}26=0{,}162$.

Таблица 3.2

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПРОМЕЖУТКОВ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ВЫЗОВАМИ С ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА АТС ПО ПОКАЗАТЕЛЬНОМУ ЗАКОНУ

| № интервала | Перерыв между вызовами заключен в пределах, с | Число случаев $m_i$ | Частность $\hat{p}_i = \frac{m_i}{6603}$ | $\frac{t^{(i)}+t^{(i+1)}}{2}\hat{p}_i$ | $e^{-\lambda t^{(i)}}$ | $e^{-\lambda t^{(i+1)}}$ | $p_i$ | $\frac{(\hat{p}_i - p_i)^2}{p_i}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0÷300 | 2050 | 0,3105 | 46,6 | 1 | 0,6900 | 0,3100 | $0,008 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | 301÷600 | 1423 | 0,2155 | 97,0 | 0,6900 | 0,4766 | 0,2134 | $0,207 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | 601÷900 | 974 | 0,1475 | 110,6 | 0,4766 | 0,3293 | 0,1473 | $0,017 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | 901÷1200 | 677 | 0,1025 | 107,6 | 0,3293 | 0,2272 | 0,1021 | $0,06 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | 1201÷1500 | 461 | 0,0698 | 94,3 | 0,2272 | 0,1568 | 0,0704 | $0,091 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 1501÷1800 | 310 | 0,0470 | 77,6 | 0,1568 | 0,1086 | 0,0485 | $0,465 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 1801÷2100 | 218 | 0,0330 | 64,4 | 0,1086 | 0,0750 | 0,0336 | $0,107 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 2101÷2400 | 151 | 0,0228 | 51,4 | 0,0750 | 0,0518 | 0,0232 | $0,069 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 2401÷2700 | 102 | 0,0155 | 39,6 | 0,0518 | 0,0358 | 0,0160 | $0,156 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | 2701÷3000 | 75 | 0,0113 | 32,2 | 0,0358 | 0,0247 | 0,0111 | $0,036 \cdot 10^{-4}$ |
| 11 | 3001÷3300 | 55 | 0,00835 | 26,3 | 0,0247 | 0,0171 | 0,0076 | $0,740 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | 3301÷3600 | 44 | 0,0067 | 23,1 | 0,0171 | 0,0118 | 0,0053 | $3,7 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | 3601÷3900 | 26 | 0,00395 | 15,1 | 0,0118 | 0,0081 | 0,0037 | $0,169 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | 3901÷4200 | 18 | 0,00272 | 11,0 | 0,0081 | 0,0056 | 0,0025 | $0,193 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | 4201 :.4500 | 11 | 0,00166 | 7,2 | 0,0056 | 0,0039 | 0,0017 | $0,009 \cdot 10^{-4}$ |
| 16 | 4501÷480 | 8 | 0,00121 | 5,6 | 0,0039 | 0,0027 | 0,0012 | $0,001 \cdot 10^{-4}$ |
| | | $\sum_{i=1}^{16} m_i = 6603$ | $\sum_{i=1}^{16} \hat{p}_i = 1$ | $\bar{t} = 809,6$ | | | | $\sum_{i=1}^{16} \frac{(\hat{p}_i - p_i)^2}{p_i} = 5,984 \cdot 10^{-4}$ |

По таблице критерия Колмогорова [70] находим вероятность $K(y) \approx 0$. Тогда вероятность $P(y)$ того, что за счет чисто случайных причин максимальное расхождение $D$ будет не меньше, чем фактически наблюдаемое, равна $P(y) = 1 - K(y) \approx 1$.

Так как в рассматриваемом примере $P(y) \approx 1$, то гипотеза о показательном законе распределения случайной величины интервалов между соседними вызовами с телефонного аппарата АТС соответствует опытным данным.

Таким образом, проверка данной гипотезы по двум критериям дала совпадающий результат, причем в обоих случаях вероятность совпадения теоретической и эмпирической функций близка к единице. Следовательно, с очень большой уверенностью можно утверждать, что в данной сети входящий поток подчиняется закону распределения Пуассона, т. е является простейшим, и для расчета сети

связи могут быть применены формулы, указанные в табл. 2.2. Можно также утверждать о незначительности искажений общей картины потока, вносимых случайными «никами» и «ямами» вызовов, повторными вызовами и отсутствием ординарности. Если бы проверка данной гипотезы дала отрицательный результат, необходимо было бы рассмотреть другую гипотезу о характере входящего потока. Это потребовало бы (при соответствии новой гипотезы опытным данным) применения соответствующих формул для расчета системы связи.

В случае, когда перечисленные выше факторы (элементы нестационарности, повторные вызовы, неординарность) имеют большее влияние, входящий поток искажается значительно и таких близких к единице значений вероятности совпадения теоретической и эмпирической функций, как в рассмотренном примере, получить не удается. Можно считать, что если эта вероятность больше 0,5, но меньше 0,7, то допустимо принимать предположение о применении рассматриваемой теоретической функции для аппроксимации статистических данных. Однако в таких случаях следует учитывать физическое содержание статистики и пытаться разделить влияющие факторы — например, принимать меньшие отрезки времени при отсутствии стационарности, выделять повторные вызовы и т. д. Если эти меры не повышают вероятности, то статистические параметры непригодны для использования в теоретических исследованиях и проектировании сетей.

В случаях, когда вероятность совпадения теоретической и статистической функций больше 0,7, можно говорить об удовлетворительной степени согласования опытных данных с теоретическими посылками. При величине вероятности выше 0,7 при проектировании сетей допустимо использовать статистические характеристики потока в качестве параметров теоретического распределения.

В соответствии с методикой, изложенной выше, могут быть проверены различные гипотезы о законах распределения случайных величин, характеризующих моменты возникновения как документированной, так и недокументированной информации, поступающей на вход сетей производственной связи. Результаты проверки позволяют выбрать для расчета сетей связи соответствующий математический аппарат.

*Объемы документированной информации* по всему потоку в целом, по отдельным направлениям, по показателям содержания и т. д. подчиняются нормальному закону распределения. Это означает, что плотность распределения случайной величины объема сообщения

$$f(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-M)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (3.3)$$

$V$ — объем сообщений; $M$ — математическое ожидание потока:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{n}, \qquad (3.4)$$

где $n$ — число обследованных потоков рассматриваемого вида (поток в целом, по отдельным направлениям и т. д.); $\sigma$ — среднее квадратическое отклонение от величины математического ожидания, несмещенная оценка которого равна:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(M-V)^2}. \qquad (3.5)$$

Так как величины $M$ и $\sigma$ находятся по материалам собранной статистики, то по ф-ле (1.11) оценивается надежность этой статистики по ф-ле (1.11′) определяется ее достаточность.

Общий объем передаваемых в рассматриваемые отрезки времени сообщений рассматривается как непрерывная случайная величина. Поскольку объем выборки $n$ для анализа потоков информации в целом, по отдельным направлениям, показателям содержания и т. д. небольшой ($n<20$), то для определения доверительных интервалов параметров нормального распределения, характеризующих эти потоки, следует использовать распределение Стьюдента. Небольшая величина объема выборки объясняется тем, что исследование каждого отдельного потока требует значительных средств, сил и времени. Поэтому обычно ограничиваются сбором статистики по 3—5 потокам рассматриваемого вида (например, на 3—5 предприятиях с одной технологией; в том же количестве строительных управлений и т. д.)

Задаваясь вероятностью $\alpha$ того, что любой поток информации будет находиться в определенных ниже пределах, по таблице коэффициентов Стьюдента [176] находим величину $Z_\alpha$. Тогда объем информации $V_i$ с вероятностью $\alpha$ будет находиться в доверительном интервале:

$$M - Z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leqslant V_i \leqslant M + Z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \qquad (3.6)$$

В таблицах обычно коэффициент Стьюдента $Z_\alpha$ определяется в зависимости от числа степеней свободы $r$:

$$r = n - 1. \qquad (3.7)$$

Доверительные границы для величины среднего квадратического отклонения

$$k_1\sigma \leqslant \sigma_i \leqslant k_2\sigma, \qquad (3.8)$$

где коэффициенты $k_1$ и $k_2$ находятся из таблицы приложения 7 при заданных вероятностях $\alpha$ и числе степеней свободы, определяемых по ф-ле (3.7).

Формулы (3.6) и (3.8) позволяют установить область возможных значений величины объема сообщений, передаваемых в заданный отрезок времени (в целом, по отдельным направлениям, сторонам хозяйственной деятельности, функциям), либо для предприятия и его подразделений, где проводились статистические ис-

следования, либо для аналогичных предприятий и цехов, где такие исследования не проводились. Знание параметров объема сообщений и доверительной области его значений позволяет рассчитывать загрузку электронных вычислительных машин и связанных с их работой средств передачи информации, решать различные задачи синтеза организационных структур, оценивать качество функционирования средств передачи документированной информации и т.д.

Как указывалось выше, исследование потоков информации может вестись как по их объемам, так и по количеству документов (см. гл. 1). Однако на уровнях производства от промышленного предприятия (цеха) и выше количество документов настолько велико, что эта случайная величина может также рассматриваться как непрерывная. При количестве документов, измеряемом единицами и десятками, каждое сообщение можно рассматривать как вызов (см. ниже) и оценивать по закону распределения Пуассона.

*Количество вызовов.* На различные сети производственной связи поступает поток вызовов, который, как правило, подчиняется закону распределения Пуассона, описываемому ф-лой (2.3). Если положить отрезок времени равным единице (например, часу), то вероятность поступления за этот отрезок $k$ вызовов будет равна

$$P_k(1) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \qquad (2.3')$$

Интенсивность потока $\lambda$ — основной параметр потока, является и его математическим ожиданием, и его дисперсией (квадратом среднего квадратического отклонения). Случайная величина количества вызовов с оконечных абонентских устройств различных сетей связи в единицу времени (час, сутки) принимает только неотрицательные целочисленные значения с вероятностями (2.3').

Гипотеза о соответствии статистических данных закону Пуассона проверяется по критерию Пирсона ($\chi^2$) в порядке, приведенном выше (см. табл. 3.2). В качестве исходных данных используется массив статистической информации в виде:

$$\begin{array}{ll} x_0 \div x_1 & m_1, \\ (x_1 + 1) \div x_2 & m_2, \\ (x_2 + 1) \div x_3 & m_3, \\ \vdots & \vdots \\ (x_{n-1} + 1) \div x_n & m_n, \end{array}$$

где $x_i \div x_{i+1}$ — границы интервалов; $m_i$ — количество случаев, соответствующих $i+1$-му интервалу.

Количество интервалов устанавливается от 7 до 12. При меньшем количестве интервалов усложняется проверка статистических гипотез, при большом количестве — увеличивается объем вычислительных работ.

Учитывая, что расчеты сетей связи выполняются всегда на основе данных о величине нагрузки, а последняя колеблется в значи-

тельных пределах, не следует стремиться к большой точности вычисления параметров сетей связи: вероятности отказов, математического ожидания времени простоев вызова или обслуживателя, числа приборов и линий и т. д. Допустимая точность равна 1%. Практика показывает, что в этом случае можно получать результат с точностью до одного прибора или соединительной линии, что является вполне достаточным. Точность расчетов, связанных с проверкой статистических гипотез, должна быть значительно выше, так как при определении величины $\chi^2$ имеют очень большое значение отклонения между теоретическими и статистическими вероятностями при малых их величинах.

При проверке гипотезы о соответствии статистических данных закону распределения Пуассона ЭВМ выполняет операции в том порядке, в каком обычно проводится эта работа «вручную»:

1) суммирует все значения $m$ и получает объем выборки $\sum_{i=1}^{n} m_i$, где $n$ — число интервалов;

2) определяет статистические вероятности (частости) $\hat{p}_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$;

3) рассчитывает среднее значение каждого интервала:

$$\bar{t} = \frac{x_{i+1} + x_i}{2};$$

4) определяет произведение для каждого интервала: $\hat{p}_i \bar{t}_i$;

5) суммирует произведения $\hat{p}_i \bar{t}_i$ по всем интервалам, определяет математическое ожидание: $M = \sum_{i=1}^{n} \hat{p}_i \bar{t}_i$;

6) определяют величину для среднего квадратического отклонения по каждому интервалу: $\sigma = \sqrt{(\bar{t}_i - M)^2 \hat{p}_i}$;

7) рассчитывает общую величину среднего квадратического отклонения: $\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i$;

8) определяет коэффициент вариации: $v = \frac{\sigma}{M} 100\%$;

9) рассчитывает величину $Z_\alpha$ при заданной точности $P$ (например, 1; 5 и 10%): $Z_\alpha = \frac{P}{v} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} m_i}$;

10) рассчитывает теоретические вероятности для каждого интервала: $p_i = \sum_{k}^{x_{i+1}} \frac{M^k}{k!} e^{-M}$;

11) определяет величину: $\chi^2 \approx \sum_{i=1}^{n} m_j \sum_{i=1}^{n} \frac{(\hat{p_i} - p_i)^2}{p_i}$.

По величинам $Z_\alpha$ (по таблице интеграла Лапласа) определяется надежность собранной статистики, а по величине $\chi^2$ — соответствие собранной статистики закону Пуассона. Если вероятность согласования теоретической и эмпирической функций оказывается меньше 0,5, то предположение о простейшем потоке отвергается и следует рассматривать другие приближения для описания входящего потока (например, пользуясь табл. 2.1). При этом должен выбираться и соответствующий математический аппарат для расчета сети связи, так как формулы, сведенные в табл. 2.2, становятся непригодными.

В случаях, когда вероятность согласования теоретической и эмпирической функций больше 0,5, гипотеза о простейшем потоке принимается, причем, если эта вероятность меньше 0,7, делаются попытки «улучшить» статистику путем, например, ее раздробления по какому-нибудь признаку. Статистические характеристики используются с соответствующими поправочными коэффициентами. Если указанная вероятность больше 0,7, то в качестве расчетных берутся статистические данные.

Доверительные границы для интенсивности потока $\lambda$ распределения Пуассона с вероятностью $\alpha$ равны

$$\frac{\hat{\lambda}}{r_1} \leqslant \lambda \leqslant \frac{\hat{\lambda}}{r_2}, \qquad (3.9)$$

где $\hat{\lambda}$ — статистическое значение интенсивности потока; $r_1$; $r_2$ — коэффициенты, определяемые по [176].

В качестве примера рассмотрим статистику числа вызовов в час наибольшей нагрузки с одного телефонного аппарата АТС (табл 3.3). Указанная статистика собрана в ряде строительных организаций. Проверим ее соответствие закону Пуассона.

Величина $\chi^2 \approx 342 \cdot 0{,}029 = 10{,}0$.

По таблицам распределения $\chi^2$ [70] при 14—2=12 степенях свободы находим, что доверительная вероятность приближается к 0,7. Таким образом, можно считать, что предложенная гипотеза удовлетворительно соответствует опытным данным.

Определим доверительные интервалы при разных значениях доверительных вероятностей Учитывая, что $m$ 342, найдем [176] величины $r_1$, и $r_2$, а по ним и доверительные интервалы по ф-ле (3.9). Данные расчета сведены в табл. 3.4

Данные, приведенные в табл. 3.4, позволяют производить расчет нагрузки в сети производственной связи не только при какой-то фиксированной величине интенсивности потока, а при наибольших или наименьших ее значениях и задан-

Таблица 3.3

СТАТИСТИКА ЧИСЛА ВЫЗОВОВ В ЧНН С ОДНОГО ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА, УСТАНОВЛЕННОГО В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

| $c$ | $m_i$ | $\hat{p}_i = \frac{m_i}{342}$ | $\hat{cp}_i$ | $p_i$ | $\lvert \hat{p}_i - p_i \rvert$ | $\frac{(\hat{p}_i - p)^2}{p_i}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 16 | 0,047 | 0,140 | 0,022 | 0,024 | 0,003 |
| 4 | 26 | 0,076 | 0,304 | 0,052 | 0,024 | 0,001 |
| 5 | 35 | 0,102 | 0,511 | 0,091 | 0,011 | 0,001 |
| 6 | 50 | 0,146 | 0,876 | 0,128 | 0,018 | 0,003 |
| 7 | 64 | 0,187 | 1,308 | 0,149 | 0,038 | 0,010 |
| 8 | 49 | 0,143 | 1,145 | 0,131 | 0,013 | 0,001 |
| 9 | 42 | 0,123 | 1,104 | 0,101 | 0,021 | 0,004 |
| 10 | 25 | 0,073 | 0,730 | 0,071 | 0,002 | 0,000 |
| 11 | 18 | 0,053 | 0,578 | 0,045 | 0,007 | 0,001 |
| 12 | 7 | 0,020 | 0,245 | 0,026 | 0,006 | 0,001 |
| 13 | 5 | 0,015 | 0,190 | 0,014 | 0,000 | 0,000 |
| 14 | 2 | 0,006 | 0,082 | 0,007 | 0,001 | 0,000 |
| 15 | 2 | 0,006 | 0,088 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| 16 | 1 | 0,003 | 0,047 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Итого | 342 | 1,0 | $\bar{c} = 7,3$ | | | 0,029 |

Примечание. В табл. 3.3 обозначено: $c$ — число вызовов в чнн; $m_i$ — число случаев, когда количество вызовов находится в $i$-м интервале.

Таблица 3.4

ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ВЫЗОВОВ В ЧНН С ОДНОГО ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА АТС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ

| $\alpha$ | $r_1$ | $r_2$ | Доверительные интервалы $\frac{7,347}{r_1} \leqslant \lambda \leqslant \frac{7,347}{r_2}$ |
|---|---|---|---|
| 0,8 | 1,045 | 0,955 | $7,05 \leqslant \lambda \leqslant 7,7$ |
| 0,9 | 1,075 | 0,935 | $6,85 \leqslant \lambda \leqslant 7,85$ |
| 0,95 | 1,095 | 0,915 | $6,75 \leqslant \lambda \leqslant 8,00$ |
| 0,975 | 1,115 | 0,90 | $6,6 \leqslant \lambda \leqslant 8,15$ |
| 0,99 | 1,140 | 0,885 | $6,45 \leqslant \lambda < 8,3$ |
| 0,999 | 1,195 | 0,85 | $6,15 \leqslant \lambda \leqslant 8,6$ |

ной величине доверительной вероятности $\alpha$. Качество такого расчета будет выше, поскольку он дает возможность установить границы требуемого количества оборудования, способствует принятию правильного инженерного решения.

Число степеней свободы зависит от числа ограничений, накладываемых на статистику. Обычно имеется одно такое ограничение, а именно $\sum_{i=1}^{n} \hat{p}_i = 1$, но если устанавливается соответствие этой статистики какому-либо теоретическому закону, то к нему добавляется число параметров этого закона. Например, для простейшего потока есть один такой параметр: величина интенсивности потока $\lambda$; для нормального распределения — два: математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение. Поэтому для закона Пуассона число отнимаемых от $n$ параметров равно 2, для нормального закона — 3 и т. п.

Рассмотренные примеры дают представление о механизме обработки статистических данных, характеризующих входящий поток. Важнейшим результатом указанной обработки является проверка соответствия входящего потока простейшему и установление параметров потока.

Поскольку статистические исследования весьма трудоемки, они производятся не перед каждым проектом. Обычно их проводят, когда та или иная сеть проектируется впервые и практически ничего неизвестно об ожидаемом входящем потоке (например, сеть передачи данных, производственный фототелеграф, система связи с подвижными объектами и т. д.). В таких случаях организуют исследования на опытных сетях и соответственно обобщают полученные результаты. Исследования входящего потока проводятся при проектировании больших систем (например, реконструкции системы производственной связи крупного металлургического комбината, проектировании сети производственных АТС железорудного бассейна и т. д.), так как ошибки из-за неверно принятых посылок о входящем потоке могут быть весьма значительными. Очень ответственны статистические исследования, предшествующие разработке типовых проектов.

В большинстве случаев используется долговременный инженерный опыт проектировщика, позволяющий переносить накопленный при разработке проектов других сетей опыт на данную сеть. Однако практика показывает, что во всех случаях, когда статистические исследования проведены и должным образом обработаны, качество проектов, базирующихся на них, значительно возрастает.

Время обслуживания поступившего требования (вызова, сообщения) представляет собой продолжительность пребывания требования (вызова, сообщения) в системе связи. Для разных сетей производственной связи это время имеет разное физическое содержание. Например, для телефонной связи оно охватывает промежуток времени от момента снятия абонентом телефонной трубки до момента отбоя; для телеграфной связи — от мо-

мента осуществления вызова телеграфной станции до момента окончания передачи телеграммы и отбоя и т. д. Нетрудно видеть, что время обслуживания включает в себя не только время собственно осуществления процесса передачи информации (продолжительность разговора, передачи телеграммы и т. п.), но и время различного рода ожиданий, которые связаны с этим процессом и имеют место, пока система связи обслуживает данный вызов (время набора номера, время ожидания освобождения занятого средства связи на входящем конце и т. д.). Время обслуживания меньше времени доставки информации, поскольку последнее включает в себя, кроме того, время подхода к средству связи на исходящем конце, ожидания его освобождения и другие отрезки времени, в течение которых вызов (сообщение) имеется, но не находится на обслуживании в системе связи.

Время обслуживания поступившего вызова обычно подчиняется показательному закону распределения, т. е. вероятность того, что продолжительность разговора $\tau$ (передача текста по телеграфу и т. п.) не превысит наперед заданное время $t_0$, равна

$$P(\tau \leqslant t_0) = 1 - e^{-\lambda t_0}. \qquad (3.10)$$

В качестве примера на рис. 3.5 приводятся графики эмпирической и теоретической функций распределения случайной величины

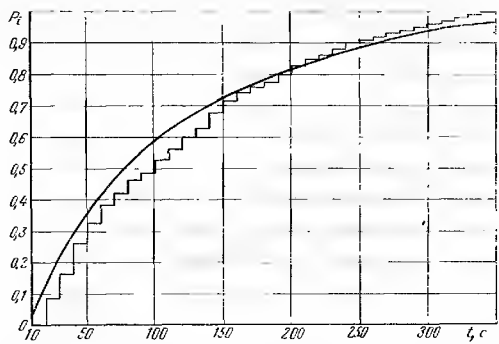



Рис. 3.5. Эмпирическая и теоретическая функции распределения случайной величины продолжительности разговора по телефонному аппарату АТС

продолжительности разговора по телефонному аппарату АТС. Исследования проводились в ряде строительных организаций. Объем выборки $n=5497$; параметр закона $\lambda=0{,}0089$ с$^{-1}$; величина $T_{\text{п}} = 1/\lambda = 112$ с — средняя продолжительность (математическое ожидание) разговора.

Среднее квадратическое отклонение равно $1/\lambda$, и коэффициент вариации для показательного распределения равен 100%. Оценка величин математического ожидания и среднего квадратического отклонения по данным статистики производится по ф-лам (3.4) и (3.5). Для оценок величины математического ожидания средней продолжительности разговора используется ф-ла (3.1). Величина математического ожидания интенсивности потока $\lambda$ с вероятностью $\alpha$ будет находиться в доверительном интервале

$$\frac{\hat{\lambda}}{r_1} \leqslant \lambda \leqslant \frac{\hat{\lambda}}{r_3}, \qquad (3.11)$$

где $\hat{\lambda}$ — значение интенсивности, полученное по данным статистики; $r_1$, $r_3$ — коэффициенты, определяемые по специальным таблицам [176].

Нетрудно видеть, что доверительными границами среднего времени разговора $T_и$ с той же вероятностью будут

$$r_3 \frac{1}{\hat{\lambda}} \leqslant T_и \leqslant r_1 \frac{1}{\hat{\lambda}}. \qquad (3.11')$$

Определим доверительные границы для средней продолжительности разговора $T_и$ по данным статистики, приведенной на рис. 3.5 при разных значениях доверительной вероятности. Данные расчета сведены в табл. 3.5.

Величина $r_1$ находилась с учетом того, что $n>1000$. Так как $1/\lambda = 112$ с, то $112r_3 \leqslant T_и \leqslant 112r_1$.

Соответствие опытных данных показательному закону распределения может быть установлено по критериям Пирсона или Колмогорова аналогично тому, как это было сделано выше (см. табл. 3.2).

Из табл. 3.5 следует, что величина телефонной нагрузки может быть рассчитана не при одном фиксированном значении времени разговора, а при двух значениях, определяющих верхнюю и нижнюю границу доверительного интервала при заданной доверительной вероятности. Это повышает точность расчетов, так как позволяет получить целую область возможных проектных решений. Проектировщику остается лишь оценить ширину данной области и принять соответствующие рекомендации и решения

Таблица 3.5

ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАЗГОВОРА $T_и$ ПО ДАННЫМ СТАТИСТИКИ, ПРИВЕДЕННОЙ НА РИС. 3.5 ПРИ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ $\alpha$

| $\alpha$ | $r_1$ | $r_3$ | $r_3 \frac{1}{\hat{\lambda}} \leqslant T_и \leqslant r_1 \frac{1}{\hat{\lambda}}$ |
|---|---|---|---|
| 0,8 | 1,03 | 0,97 | $109 \leqslant T_и$ 115 |
| 0,9 | 1,04 | 0,96 | $108 \leqslant T_и$ 116 |
| 0,95 | 1,05 | 0,95 | $107 \leqslant T_и$ 118 |
| 0,975 | 1,06 | 0,94 | $105 \leqslant T_и$ 119 |
| 0,99 | 1,08 | 0,93 | $104 \leqslant T_и$ 121 |
| 0,999 | 1,11 | 0,91 | $102 \leqslant T_и$ 125 |

## 3.3. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СЕТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

В системах с ожиданием требование не покидает сеть связи, пока не будет полностью обслужено; в системах с потерями требование, заставшее все обслуживающие приборы занятыми, те-

ряется. При передаче информации в реальных сетях связи встречаются случаи, когда вследствие отсутствия или занятости требуемого абонента, занятости или неисправности соединительных путей и т. п. соединение в данный момент установлено быть не может. В этих условиях вызывающий абонент может вести себя поразному:

а) повторять вызовы (или ожидать) до тех пор, пока соединение не установится (система с ожиданием);

б) отказаться от установления соединения (система с потерями);

в) повторять вызовы или ожидать в течение некоторого времени, а затем отказаться от установления соединения (система смешанного типа).

Нетрудно видеть, что время, затраченное на установление соединения, $t_{ож} \to 0$, когда в сети связи не возникает никаких отказов; $t_{ож} > 0$ — в системе с ожиданием; $t_{ож} \to \infty$ — в системах с потерями и $0 < t_{ож} \leqslant \infty$ — в системах смешанного типа.

Поскольку количество и содержание информации на входе и выходе сети связи могут не совпадать между собой, а время передачи — не удовлетворять поставленным задачам вследствие перегрузки входящими требованиями, недостаточного качества тракта связи и т. д., то для оценки работы сетей связи вводится понятие эффективности функционирования.

Рассмотрим выполнение сетью связи своих функций — динамику осуществления доставки информации. На вход сети постоянно в течение неограниченно длительного времени поступают различные сообщения [1]). Каждое из них требует для своей передачи определенное время $T_{и_i}$, а также задерживается в сети на какое-то непроизводительное время $T_{п_i}$ из-за недостаточно эффективной ее работы. Совершенно очевидно, что если два каких-либо сообщения должны для своей передачи затратить одно и то же время $T_и$, то сеть связи будет работать более эффективно в тот отрезок времени, когда будет передаваться сообщение, потребовавшее меньшие непроизводительные затраты времени. Так как условия работы сети постоянно изменяются случайным образом, то каждое вновь поступившее на ее вход сообщение может быть передано со случайными непроизводительными затратами. Будем фиксировать время нахождения в сети (время собственно передачи и непроизводительные затраты времени) каждого сообщения.

Любая реализация процесса доставки информации имеет «свою» продолжительность времени, необходимого для установления соединения и передачи. Следовательно, при $i$-м вызове $T_{дu_i} = T_{п_i} + T_{и_i}$, где $T_{дu_i}$ — общее время доставки информации; $T_{и_i}$ — эффективное время передачи информации; $T_{п_i}$ — непроизводительные затраты времени при $i$-м вызове.

---

[1]) Такие системы называются системами многократного действия

Из множества переданных по сети сообщений, выделим такие, время доставки которых одинаково. Можно вычислить и соответствующую вероятность: для этого надо количество случаев, когда время доставки информации равно $T_д$, разделить на общее число передач информации (рассматривается определенный отрезок времени в стационарном режиме функционирования сети).

Анализируя сообщения, время доставки которых одинаково, можно установить, что не все они обладают одной и той же структурой — некоторые имеют меньшее время собственно передачи информации, но зато большее время непроизводительных затрат; другие, наоборот, большее время собственно передачи информации и меньшее время непроизводительных затрат. Логично предположить, что сеть функционирует более эффективно в тех случаях, когда при одном и том же времени доставки информации отношение $T_и/T_д$ будет больше, так как в этом случае удельный вес собственно передачи информации в общем объеме «проделанной работы» — всего процесса доставки информации — будет больше.

Введем понятие состояние сети связи как совокупность таких условий ее функционирования, которые обеспечивают доставку любого сообщения с продолжительностью «чистой» передачи $T_и$ и одной и той же величиной непроизводительных затрат времени $T_п$.

Так как состояние сети зависит от большого количества случайных факторов (количества поступивших вызовов, свободных и занятых приборов и соединительных путей, ожидающих и потерянных вызовов, а также надежности аппаратов и т. д.), то в произвольный момент времени оно является случайным и может быть описано количественно с применением математического аппарата теории вероятности. Отметим, что каждое состояние определяется случайной величиной отношения $T_и/T_д$. Поскольку сеть связи в каждый данный момент времени может пребывать только в одном из допустимого множества состояний, то каждому состоянию сопоставляется соответствующая вероятность. Обозначим вероятность нахождения сети в $i$-м состоянии через $P_i$. Если построить график изменения величины $P_i$ в зависимости от отношения $T_и/T_д$, то можно получить функцию плотности распределения непрерывной случайной величины отношения $T_и/T_д$, характеризующего нахождение сети в каком-либо состоянии.

Принципиально возможно рассматривать как непрерывные, так и дискретные случайные величины отношения $T_и/T_д$, определяющего нахождение сети связи в каком-либо состоянии. Однако в большом количестве случаев допустимо рассматривать только дискретные значения величин $T_и$ и $T_д$, что позволяет ограничиться счетным числом состояний сети и упростить выкладки.

Теперь можно дать определение эффективности функционирования сети связи.

Эффективность функционирования сети есть математическое ожидание случайной величины характеристики ее состояния. Таким образом, эффективность функционирования представляет собой среднее состояние, в котором находится данная сеть при рассмотрении ее функционирования в течение какого-либо продолжительного (относительно величины $T_{дн}$) отрезка времени. Эффективность функционирования является показателем целесообразности использования системы для выполнения заданных функций в данных условиях и в рассматриваемый отрезок времени. При этом предполагается, что за время передачи одного сообщения состояние сети не изменяется [1]).

Обозначим эффективность функционирования сети через $E$. Тогда в соответствии с определением эффективности функционирования

$$E = \sum_{i=0}^{z-1} P_i \frac{T_{v_i}}{T_{дн_i}} = \sum_{i=0}^{z-1} P_i \frac{T_{и_i}}{T_{и_i} + T_{п_i}}, \qquad (3.12)$$

где $z$ — число возможных состояний сети. Если рассматривать отношение $T_{v_i}/T_{дн_i}$ как непрерывную случайную величину, то в ф-ле (3.13) сумма заменяется интегралом и $z \to \infty$.

Время $T_и$ зависит от двух параметров: объема передаваемого сообщения $V_{пер}$ и скорости его передачи по сети связи $c$: $T_и = V_{пер}/c$. Время передачи информации зависит от абонентов (скорости речи, подхода к средству связи и т. д.), состояния тракта передачи (уровня шумов, затухания) и изменяется не только от соединения к соединению, но и внутри каждой конкретной передачи. На состояние тракта передачи влияет целый ряд факторов, в том числе и протяженность канала связи, что не позволяет выделить расстояние как особый фактор при определении эффективности функционирования систем связи.

Расчленив процесс доставки информации на время собственно передачи информации и непроизводительные затраты времени, мы, по существу, создали простейшую модель процесса. Назовем элементом модели процесса доставки информации относительно независимую его часть, отражающую те или иные затраты времени в ходе этого процесса. В этом плане величины $T_и$ и $T_п$ могут рассматриваться как элементы такой модели. Иными словами, модель процесса доставки информации показывает, по каким причинам и за счет чего происходят различного рода затраты времени $T_{дн}$, так как

$$T_{дн} = \sum_{j=0}^{n-1} T_j,$$

где $T_j$ — временная характеристика $j$-го элемента модели процесса доставки информации; $n$ — число элементов модели процесса до-

[1]) Так называемые системы кратковременного (мгновенного) действия.

ставки информации. Нетрудно видеть, что при неограниченном увеличении числа $n$ реальный процесс доставки информации будет наиболее полно отображаться в модели.

Являясь элементом модели процесса доставки информации, время передачи, как правило, не подразделяется на отдельные составляющие его части. Наоборот, непроизводительные затраты времени при моделировании процесса доставки информации расчленяются на большое количество частей, каждая из которых рассматривается как самостоятельный элемент модели указанного процесса. В самом общем виде к непроизводительным затратам относятся затраты времени на:

а) подход к средству связи (телефонному аппарату, радиостанции и т. д.) на исходящем конце — $t_0$;

б) ожидание освобождения средства связи вызывающего абонента — $t_1$;

в) выполнение технически необходимых операций по установлению соединения (набор номера, нажатие ключа на коммутаторе и т. д.) — $t_2$;

г) ожидание освобождения соединительных путей к вызываемому абоненту — $t_3$;

д) ожидание освобождения средства связи вызываемого абонента — $t_4$;

е) ожидание ответа вызываемого абонента (подход к средству связи на входящем конце) — $t_4$;

ж) ожидание, связанное с ограниченной надежностью средств связи, — $t_5$;

з) увеличение продолжительности передачи информации при недостаточном качестве тракта связи — $t_6$.

Приведенные выше рассуждения относятся в равной мере и к разговору по сети АТС, и по сети диспетчерской связи, и к передаче телеграммы по сети абонентского телеграфа, прямому телеграфному каналу и т. п. Изменяются только число возможных состояний сети и продолжительность отдельных состояний. Например, при разговоре по сети диспетчерской связи могут иметь место затраты на подход к телефонному аппарату, выполнение технически необходимых операций по установлению соединения (в данном случае снятие трубки с рычага телефонного аппарата), ожидание ответа вызываемого абонента (диспетчера), ожидание, связанное с ограниченной надежностью средств связи, и, наконец, увеличение продолжительности передачи информации при недостаточном качестве тракта. При передаче телеграмм по сети абонентского телеграфа присутствуют все виды непроизводительных затрат времени, которые имеют место при осуществлении разговора по сети АТС, за исключением ожидания ответа вызываемого абонента, поскольку телеграмма может быть передана и в его отсутствие. При этом с точки зрения математической модели безразлично, будет соединение устанавливаться вручную (с участием оператора) или автоматически. В этих случаях изменяется не сама

модель, а количественные характеристики (время ожидания; время, необходимое для осуществления технических операций по установлению соединения и т. п.) определенных элементов, составляющих данную модель.

Перечисленные выше виды затрат присутствуют не при каждой передаче сообщений, т. е. в каждом конкретном случае суммарная величина непроизводительных затрат времени может выражаться, например, следующим образом: $T_{\text{п}}=t_{\text{т}}$; $T_{\text{п2}}=t_0+t_{\text{т}}$; $T_{\text{пз}}=t_0+t_1+t_{\text{т}}$ и т. д. Очевидно, что не все элементы процесса доставки информации являются равноправными: на один процесс не может быть осуществлен без затрат времени $t_{\text{т}}$ и $T_{\text{к}}$. Зато все остальные элементы могут находиться в любом сочетании друг с другом. Пусть каждый элемент процесса доставки информации может принимать $z_j$ дискретных значений непроизводительных затрат времени в этом элементе ($j$ – индекс элемента). Тогда общее число возможных состояний сети, соответствующее осуществленным процессам доставки информации,

$$z=\prod_{j=1}^{n'} z_j.$$

Здесь $n'$ — число элементов, которые могут находиться в любом сочетании друг с другом: $n'=n-2$, где $n$ – общее количество элементов, включая $T_{\text{н}}$ и $t_{\text{т}}$, которые присутствуют при каждом осуществленном процессе доставки информации.

Часто имеется возможность рассматривать не все множество дискретных значений каждой компоненты вектора, а только три значения, соответствующие: а) отсутствию каких-либо затрат времени; б) математическому ожиданию этих затрат; в) срыву доставки информации. В данном случае происходит уменьшение числа возможных состояний сети, соответствующее осуществленным процессам доставки информации: $z=\prod_{j=1}^{n'} 3=3^{n'}$.

Наконец, если предположить, что абонент ни в коем случае не откажется от попытки установить соединение вне зависимости от продолжительности требующегося для этого времени, можно получить несколько важных следствий.

1. Каждый элемент модели может находиться только в двух состояниях: ожидание есть и ожидания нет. Сумма вероятностей двух рассматриваемых состояний равна единице.

2. Поскольку информация с вероятностью, равной единице, будет доставлена, то в каждой реализации этого процесса присутствует время $T_{\text{п}}$.

3. Никакая информация не может быть доставлена без затрат времени, технически необходимых для установления соединения, поэтому в каждой реализации данного процесса присутствует время $t_{\text{т}}$.

В случае, когда абонент не отказывается от установления соединения, общее число состояний сети равно

$$z = \prod_{j=1}^{n'} 2 = 2^{n'}.$$

Если $n' = 7$ и каждый из этих элементов процесса доставки информации может принимать три возможных состояния, то вероятность $i$-го состояния сети может быть представлена следующей матрицей:

$$P = \begin{Vmatrix} p_0 & q_0 & p_{00} \\ p_1 & q_1 & p_{01} \\ p_2 & q_2 & p_{02} \\ p_3 & q_3 & p_{03} \\ p_4 & q_4 & p_{04} \\ p_5 & q_5 & p_{05} \\ p_6 & q_6 & p_{06} \end{Vmatrix},$$

где $p_0$, $p_1$, $p_3$ ... — вероятности того, что будут иметь место затраты времени на подход к средству передачи информации, ожидание освобождения средств связи вызывающего абонента, ожидание освобождения соединительных путей и т. д.; $q_0$, $q_1$, $q_2$ — вероятности отсутствия затрат времени на подход к средству связи и т. д.; $p_{00}$, $p_{01}$, $p_{02}$ — вероятности отказа вызывающего абонента от осуществления передачи информации из-за большой удаленности средства связи и т. д.

Аналогично представляются затраты времени $T_u$, в матрице которого крайние столбцы заняты нулями и бесконечностями, а средний — величинами математических ожиданий соответствующих затрат времени, а также затраты времени $T_u$, в матрице которого два столбца занимают математические ожидания этой величины, а третий — нули.

Если перечисленные выше 9 элементов модели не позволяют полностью отобразить какие-либо специфические особенности процесса доставки информации в какие-либо сети производственной связи, то необходимо ввести новые элементы, которые дали бы возможность учесть эти особенности. Однако увеличение числа элементов модели нежелательно, так как число возможных состояний сети, а следовательно, и объем требуемых вычислений, как было показано выше, определяется количеством элементов, входящим в показатель степени. Поэтому число возможных состояний в зависимости от количества элементов модели возрастает весьма резко.

Таким образом, к модели процесса доставки информации предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, любой реальный процесс доставки информации может быть полно отоб-

ражен при неограниченном количестве элементов, а с другой стороны, при увеличении количества элементов резко возрастает число возможных состояний сети, а следовательно, и вычислительные трудности. Процесс доставки информации удается свести к модели, состоящей из ограниченного числа элементов путем расширения понятия того или иного элемента модели. Например, ориентирование входящего вызова, вручение корреспонденции по адресу, дешифровка ее могут быть включены в элемент модели «Подход к средству связи на входящем конце».

Если два абонента АТС соединяются через две, три станции, то элемент модели «Ожидание в процессе собственно установления соединения» может быть разбит на подэлементы, число которых соответствует количеству станций. При этом соответственно увеличивается количество состояний сети. Чтобы избежать последнего, рассматриваемому элементу модели ставится в соответствие математическое ожидание непроизводительных затрат времени в процессе собственно установления соединения, характеризующее весь тракт установления соединения.

Аналогичное положение может иметь место и на сети абонентского телеграфа, когда соединение устанавливается через две или более АТА (АТР), на сети передачи данных, в некоторых других сетях.

Из сказанного следует, что, по всей вероятности, все многообразие форм протекания процессов доставки информации можно отобразить в виде моделей, составленных из одних и тех же элементов и отличающихся между собой числом этих элементов и математическими ожиданиями затрат времени в каждом из них.

Формула (3.12) выражает эффективность функционирования системы связи при заданном объеме сообщений. Если задано время передачи информации, то эффективность функционирования записывается в виде

$$E = \sum_{i=0}^{z} P_i \frac{V_{\text{пер}_i}}{V_{\text{пер}_i} + V_{\text{п}_i}}, \qquad (3.12')$$

где $V_{\text{п}_i} = T_{\text{п}_i} c_i$ — объем сообщений, который был бы передан за время $T_{\text{п}_i}$; $V_{\text{пер}_i}$ — переданный (принятый) объем сообщений (полезный объем).

При обращении к системе связи абоненты заинтересованы в том, чтобы затратить минимальное время на передачу сообщения и особенно на различные ожидания. Поэтому показатель эффективности функционирования системы связи для $i$-го вызова $\Phi_i$ целесообразно оценить следующим образом:

$$\Phi = \frac{T_{v_i}}{T_{v_i} + T_{\text{п}_i}}. \qquad (3.13)$$

При увеличении величины $T_{\text{п}_i}$ показатель эффективности уменьшается. При $\Phi_i = 0$ информация не передается и система стано-

вится абсолютно неэффективной. Это бывает в тех случаях, когда $T_{\text{ц}i} \to \infty$ (информация не передана) или $T_{\text{п}i} = 0$ (отсутствуют вызовы). Таким образом, $0 \leqslant \Phi_i \leqslant 1$. Динамика изменения величины $\Phi_i$ во времени показана на рис. 3.6*б*.

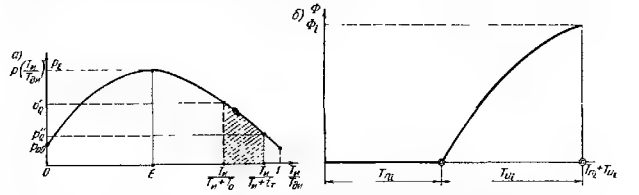



Рис. 3.6. К выводу показателей эффективности функционирования: *а)* соотношение между величинами $E$ и $Q$; *б)* динамика изменения величины $\Phi_i$ во времени

При заданном времени передачи информации показатель эффективности может быть выражен через объем переданных сообщений:

$$\Phi_i = \frac{V_{\text{пер}i}}{V_{\text{пер}i} + V_{\text{п}i}}. \qquad (3.13')$$

Заметим, что эффективность не пропорциональна увеличению скорости передачи информации.

Эффективность функционирования сети связи в этом случае может быть интерпретирована как математическое ожидание показателя эффективности $\Phi_i$, взятого по всем вызовам:

$$E = M(\Phi_i) = \sum P_i \Phi_i = \sum P_i \frac{T_{\text{ц}i}}{T_{\text{ц}i} + T_{\text{п}i}} = \sum P_i \frac{V_{\text{пер}i}}{V_{\text{пер}i} + V_{\text{ц}i}},$$

где $P_i$ — вероятность появления вызова, имеющего параметры $T_{\text{ц}i}$; $T_{\text{п}i}$ или $V_{\text{пер}i}$ и $V_{\text{п}i}$.

Соотношение (3.12) или (3.12′) может быть принято за основную характеристику эффективности функционирования системы связи в тех случаях, когда ничего неизвестно о требуемых сроках доставки информации, т. е. если на время передачи информации не накладывается каких-либо ограничений. Задержка передачи информации сверх задаваемого системой управления срока может привести к непоправимым отрицательным последствиям. Вероятность того, что информация будет передана требуемому абоненту в течение времени меньше заданного, условно может быть названа оперативностью связи $Q$ и определена как

$$Q = P(T_{\text{ц}i} + T_{\text{п}i} \leqslant T_Q), \qquad (3.14)$$

где $T_Q$ — заданная системой управления величина времени (критерий оперативности).

Нетрудно видеть, что с ростом критерия оперативности связи $T_Q$ величина $Q$ будет увеличиваться, так как вероятность того, что информация может быть передана в течение большего отрезка времени возрастает. При $T_Q \to \infty$ $Q$ асимптотически стремится к единице, т. е. $Q_\infty = P(T_\text{п} + T_\text{п} < \infty)$ 1. С другой стороны, при $T_Q = 0$ $Q_0 - P(T_\text{и} + T_\text{п}) = 0$, так как никакая информация без потерь передана быть не может.

Это положение можно обобщить следующим образом: вероятность передачи информации за отрезок времени $T_Q < T_\text{и} + t_\text{т}$ равна нулю, т. е. $Q_\text{с} = P(T_\text{и} + T_\text{п} < T_\text{и} + t_\text{т}) - 0$. Минимальное значение величины $Q$ соответствует вероятности передачи информации в минимально короткие сроки (т. е. с условными потерями, не превышающими величины $t_\text{т}$, и при отсутствии явных потерь). Указанное значение может быть подсчитано по формуле

$$Q_\text{мин} - P(T_\text{и} + T_\text{п} - T_\text{и} + t_\text{т}) = q_0 q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6. \qquad (3.14')$$

Таким образом, можно сделать вывод, что оперативность связи $Q$ описывается законом распределения случайной величины $T_Q$ (критерий оперативности). Величина $Q$ определяется произведением соответствующих вероятностей.

Для сравнения оперативности связи различных систем наиболее удобно пользоваться выражением (3.14′). Это объясняется тем, что при прочих равных условиях та система связи является лучшей, у которой вероятность передачи информации в минимально возможные сроки имеет большое значение. Однако для оценок систем связи можно пользоваться всем множеством значений $Q$ в зависимости от назначения и характера этих систем. Установим связь между оперативностью и условным показателем эффективности. Перепишем ф-лу (3.14) следующим образом:

$$Q - P\left|\frac{1}{T_\text{и} + T_\text{п}} \geqslant \frac{1}{T_Q}\right| = P\left|\frac{1}{T_\text{и} + T_\text{п}} > \frac{1}{T_\text{и} + T_Q}\right|.$$

Умножая обе части неравенства, стоящего в скобках, на величину $T_\text{п}$, получим

$$Q - P\left|\frac{T_\text{и}}{T_\text{и} + T_\text{п}} \geqslant \frac{T_\text{и}}{T_\text{и} + T_Q}\right| = P(\Phi \geqslant \Phi_Q) = 1 - F(\Phi_Q),$$

т. е. оперативность связи является квантилем распределения величины

$$\Phi_Q = \frac{T_\text{и}}{T_\text{и} + T_Q}.$$

Любая информация обладает ценностью, которая со временем уменьшается, т. е. информация «стареет» [134]. Допустим, что время доставки и время обесценивания информации соизмеримы, хотя в системах управления производством такое положение имеет место не всегда. Например, время обесценивания информации, необходимой для решения многих вопросов планирования, во много раз больше, чем время ее доставки. Использование производствен-

ной связи для передачи такой информации неэффективно, поскольку оборудование системы связи загружается передачей «несрочной» информации, а «срочные» сообщения из-за этого могут быть задержаны.

Обозначим отрезок времени, определяющий срок «жизни» информации, через $T_{\text{макс}}$. Информация, имеющая указанную продолжительность «жизни», должна передаваться по системе связи, у которой

$$\max(T_{\text{и}} + T_{\text{п}}) < T_{\text{макс}}. \tag{3.15}$$

Данное выражение является основополагающим при выборе систем связи, исходя из обеспечения своевременной передачи информации. Оперативность связи может быть интерпретирована как вероятность передачи информации за время, в течение которого ценность ее положительна ($T_Q \ll T_{\text{макс}}$). Эффективность функционирования системы связи тем выше, чем больше величина $Q$ при меньшем значении $T_Q$. В самом деле, чем меньше величина $T_Q$, тем, как правило, бо́льшую ценность имеет переданная информация, а чем больше при этом вероятность передачи информации за срок не выше $T_Q$, тем больший положительный эффект достигается от использования данной системы.

Если срыв передачи информации приводит к непоправимым отрицательным последствиям, то в качестве критерия эффективности функционирования системы связи используется надежность структуры, определяемая по методологии оценки ветвящихся систем [70, 160 и др.]. При этом надо иметь в виду, что срыв передачи может произойти и за счет того, что сообщение доставлено не по адресу, и за счет неправильного адреса.

Установим соответствие между эффективностью функционирования и оперативностью связи. В данном случае будет удобно рассматривать случайную величину отношения $T_{\text{и}}/T_{\text{ди}}$, характеризующего состояние сети, как непрерывную. Выше уже указывалось, что эффективность функционирования представляет собой математическое ожидание этой случайной величины.

Допустим, нам известна плотность распределения случайной величины отношения $T_{\text{и}}/T_{\text{ди}}$ (рис. 3.6*а*). Тогда эффективность функционирования представляется на этом графике точкой, лежащей на оси абсцисс правее точки, соответствующей отношению $\dfrac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_{\text{п}}}$, где $T_{\text{п}}$ — математическое ожидание непроизводительных затрат времени: $T_{\text{п}} = \sum_{i=0}^{n'-1} t_i$.

В определение эффективности функционирования включено не математическое ожидание величины суммы непроизводительных затрат времени в элементах модели доставки информации, а математическое ожидание состояния сети, которое учитывает отсутствие при некоторых реализациях рассматриваемого процесса вооб-

ще каких-либо непроизводительных затрат времени, а также непроизводительные затраты времени, имеющие величины $T_{\text{п}} < \sum_{i=0}^{n'-1} t_i$ в тех случаях, когда хотя бы в одном из элементов модели $q_i = 0$. Поэтому отношение $T_{\text{и}}/(T_{\text{и}} + T_{\text{п}})$ характеризует нижнюю границу величины $E$. Отсюда вытекает самый простой способ оценки нижней границы величины эффективности функционирования по формуле

$$E_{\text{ниж}} = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + \sum_{i=0}^{n'-1} t_i + t_{\text{т}}},$$

где $t_i$ - математическое ожидание непроизводительных затрат времени в $i$-м элементе модели. В этой формуле все величины, стоящие в правой части, либо заданы, либо могут быть достаточно просто определены.

Отложим на оси абсцисс точку, соответствующую величине $\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_Q}$. По определению все точки, лежащие правее этой, соответствуют состоянию сети, когда информация будет доставлена за срок не выше заданного (критерия оперативности $T_Q$). Вследствие этого величина оперативности связи равна площади, заштрихованной на рис. 3.6*а*, т. е.

$$Q = \int_{\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_Q}}^{\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + t_{\text{т}}}} P\left|\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{ди}}}\right| d\left|\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{ди}}}\right|.$$

Точка $\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + t_{\text{т}}}$ является крайней правой границей возможных значений эффективной передачи информации. Поэтому наиболее жестким критерием оперативности является величина $t_{\text{т}} = T_Q$. В данном случае величина оперативности связи равна просто ординате $P''_Q$. Наоборот, при $T_Q > \frac{1-E}{E} T_{\text{и}}$ критерии оперативности можно назвать «мягкими», потому что абсцисса $\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_Q}$ будет лежать левее $E$ математического ожидания состояния сети. В этом случае требования, предъявляемые к срокам доставки информации, слабее средних условий функционирования сети.

Модель процесса доставки информации представлена на рис. 3.7. Каждый элемент этой модели может рассматриваться как генератор случайных чисел, вырабатывающий величины затрат вре-

мени на осуществление соединения с присущими им вероятностями. Главной особенностью данной модели является наличие среди ее элементов и связей между ними характеристик поведения абонентов, пользующихся сетью связи. Эти характеристики находят свое отражение в затратах времени на подход к средству связи (распределение расстояния абонента от средства связи есть функция поведения абонента), в реакции абонентов на различного рода занятости и др.

Таким образом, указанная модель есть разновидность модели системы «человек—машина», в которой роль машины играют технические средства передачи информации. Поскольку модель сети связи имеет сугубо вероятностную природу, для ее расчета необходимо применять метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Поставленная задача значительно упрощается, если все возможные значения затрат времени в пределах каждого элемента модели заменить их математическим ожиданием (рис. 3.8).

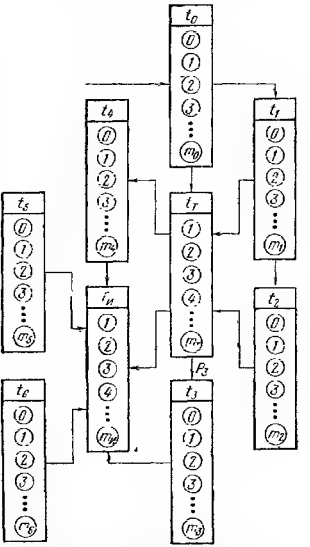



Рис. 3.7. Общая модель процесса передачи информации по сети связи

Расчет модели процесса доставки информации, представленной на рис. 3.8, производится методами комбинаторики. Вероятность каждого состояния определяется произведением соответствующих вероятностей состояний элементов (в этом произведении каждый элемент модели может быть представлен либо величиной $q_j$, либо величиной $p_j$), а затраты времени, присущие данному состоянию, являются суммой математических ожиданий затрат времени в тех элементах, которые в рассматриваемом со-

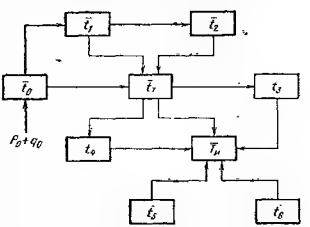



Рис. 3.8. Упрощенная модель процесса передачи информации по сети связи

стоянии представлены величиной $p_3$. На рис. 3.9 приведена модель для расчета сети связи с идеальными надежностью и качеством, а формулы для подсчета вероятностей отдельных состояний и затрат времени, соответствующих каждому состоянию, сведены в табл. 3.6.

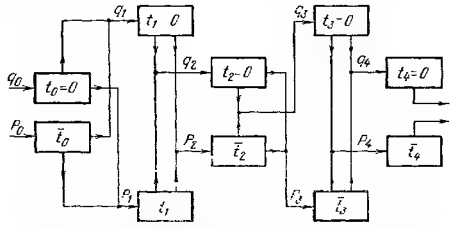



Рис. 3.9. Упрощенная модель для расчета сети связи с идеальными надежностью и качеством

Таблица 3.6

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ И ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ В СЕТИ СВЯЗИ С ИДЕАЛЬНЫМИ НАДЕЖНОСТЬЮ И КАЧЕСТВОМ

| Вероятности состояний | Непроизводительные затраты времени в состояниях | Вероятности состояний | Непроизводительные затраты времени в состояниях |
|---|---|---|---|
| $P_0 = q_0 q_1 q_2 q_3 q_4$ | $T_0 = 0$ | $P_{16} = p_0 p_1 p_2 q_3 q_4$ | $T_{16} = t_0 + t_1 + t_2$ |
| $P_1 = p_0 q_1 q_2 q_3 q_4$ | $T_1 = t_0$ | $P_{17} = p_0 q_1 p_2 p_3 q_4$ | $T_{17} = t_0 + t_2 + t_3$ |
| $P_2 = q_0 p_1 q_2 q_3 q_4$ | $T_2 = t_1$ | $P_{18} = p_0 p_1 q_2 q_3 p_4$ | $T_{18} = t_0 + t_1 + t_4$ |
| $P_3 = q_0 q_1 p_2 q_3 q_4$ | $T_3 = t_2$ | $P_{19} = p_0 q_1 p_2 q_3 p_4$ | $T_{19} = t_0 + t_2 + t_4$ |
| $P_4 = q_0 q_1 q_2 p_3 q_4$ | $T_4 = t_3$ | $P_{20} = p_0 q_1 q_2 p_3 p_4$ | $T_{20} = t_0 + t_3 + t_4$ |
| $P_5 = q_0 q_1 q_2 q_3 p_4$ | $T_5 = t_4$ | $P_{21} = q_0 p_1 p_2 p_3 q_4$ | $T_{21} = t_1 + t_2 + t_3$ |
| $P_6 = p_0 p_1 p_2 q_3 q_4$ | $T_6 = t_0 + t_1$ | $P_{22} = p_0 p_1 q_2 p_3 q_4$ | $T_{22} = t_0 + t_1 + t_3$ |
| $P_7 = p_0 q_1 p_2 q_3 q_4$ | $T_7 = t_0 + t_2$ | $P_{23} = q_0 p_1 p_2 q_3 p_4$ | $T_{23} = t_1 + t_2 + t_4$ |
| $P_8 = p_0 q_1 q_2 p_3 q_4$ | $T_8 = t_0 + t_3$ | $P_{24} = q_0 p_1 q_2 p_3 p_4$ | $T_{24} = t_1 + t_3 + t_4$ |
| $P_9 = p_0 q_1 q_2 q_3 p_4$ | $T_9 = t_0 + t_4$ | $P_{25} = q_0 q_1 p_2 p_3 p_4$ | $T_{25} = t_2 + t_3 + t_4$ |
| $P_{10} = q_0 p_1 p_2 q_3 q_4$ | $T_{10} = t_1 + t_2$ | $P_{26} = p_0 p_1 p_2 p_3 q_4$ | $T_{26} = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$ |
| $P_{11} = q_0 p_1 q_2 p_3 q_4$ | $T_{11} = t_1 + t_3$ | $P_{27} = p_0 q_1 p_2 p_3 p_4$ | $T_{27} = t_0 + t_2 + t_3 + t_4$ |
| $P_{12} = q_0 q_1 q_2 q_3 p_4$ | $T_{12} = t_1 + t_4$ | $P_{28} = p_0 p_1 p_2 q_3 p_4$ | $T_{28} = t_0 + t_1 + t_2 + t_4$ |
| $P_{13} = q_0 q_1 p_2 p_3 q_4$ | $T_{13} = t_2 + t_3$ | $P_{29} = p_0 p_1 q_2 p_3 p_4$ | $T_{29} = t_0 + t_1 + t_3 + t_4$ |
| $P_{14} = q_0 q_1 p_2 q_3 p_4$ | $T_{14} = t_2 + t_4$ | $P_{30} = q_0 p_1 p_2 p_3 p_4$ | $T_{30} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ |
| $P_{15} = q_0 q_1 q_2 p_3 p_4$ | $T_{15} = t_3 + t_4$ | $P_{31} = p_0 p_1 p_2 p_3 p_4$ | $T_{31} = t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ |

Большое количество возможных состояний затрудняет вычисление эффективности функционирования сети «вручную» и требует применения ЭВМ. Разработаны программы расчета на ЭВМ эффективности функционирования различных сетей производственной связи, с помощью которых были определены количество радиостанций для работы на одной частоте, допустимая загрузка ствола системы радиотелефонной связи «Алтай» и т. д.

Алгоритм расчета эффективности функционирования методом комбинаторики дан на рис. 3.10.

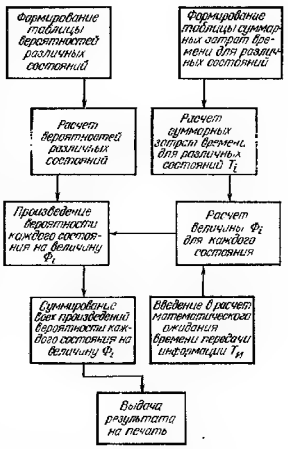

Формирование таблицы вероятностей различных состояний
Формирование таблицы суммарных затрат времени для различных состояний
Расчет вероятностей различных состояний
Расчет суммарных затрат времени для различных состояний $T_i$
Произведение вероятности каждого состояния на величину $\Phi_1$
Расчет величины $\Phi_2$ для каждого состояния
Суммирование всех произведений вероятности каждого состояния на величину $\Phi_2$
Введение в расчет математического ожидания времени передачи информации $T_{ин}$
Выдача результата на печать

Рис. 3.10. Алгоритм расчета эффективности функционирования методом комбинаторики

## 3.4. ОЖИДАНИЕ В ПРОЦЕССЕ УСТАНОВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ

### Общие положения

Для более полного рассмотрения эффективности функционирования сетей связи необходимо проследить, как изменяются величины $p_i$, $q_i$, $T_i$ в зависимости от параметров, определяющих затраты времени на установление соединения. К указанным параметрам относятся: телефонная нагрузка, число абонентских устройств в сети, число лиц, пользующихся одним средством связи, затухание между абонентами и т. д.

Все элементы математической модели, описанной в предыдущем разделе, можно разбить на три группы:

1) элементы, которые участвуют в процессе установления соединения:

2) элементы, которые участвуют в процессе осуществления собственно передачи информации;

3) элементы, которые участвуют и в процессе установления соединения и в процессе осуществления собственно передачи информации.

К первой группе относятся непроизводительные затраты времени на подход к средству связи на входящем и исходящем концах, ожидание освобождения занятого средства связи на входя-

щем и исходящем концах, ожидание в процессе коммутации, а также затраты времени на выполнение технически необходимых операций по установлению соединения. Ко второй группе элементов относятся время собственно передачи информации и достоверность канала связи, из-за недостаточности которой это время может увеличиваться. Третью группу элементов составляет надежность всего тракта соединения и передачи информации.

В данном разделе рассматривается первая группа элементов модели применительно к сети производственной автоматической телефонной связи, как наиболее характерной. Особенности, возникающие при расчете других сетей производственной связи, будут указаны в гл. 4.

### Подход к средству связи на исходящем конце

*Нормирующие условия.* К абонентским устройствам производственной связи, требующим подхода для передачи информации, относятся телефонные аппараты автоматической и некоммутируемой (диспетчерской и директорской) связи, пульты коммутаторов радиостанций, аппараты производственной громкоговорящей связи и т. д. Подход к абонентским устройствам различных видов связи, как правило, осуществляется идентично. Поэтому ниже вопрос подхода к абонентскому устройству связи излагается применительно к телефонному аппарату, как наиболее массовому абонентскому устройству, хотя основные выводы могут быть распространены не только на технические средства других видов связи с учетом их особенностей, но и на различного рода пульты телемеханики и оргтехники

Надо отметить, что вопросы подхода к телефонному аппарату и связанные с этим затраты времени до настоящего времени практически не исследовались. Это объясняется, во-первых, тем, что указанные затраты происходят не в технических средствах передачи информации и, собственно говоря, от работы самой системы связи прямо не зависят; во-вторых, из-за отсутствия общей методики расчета величины непроизводительных затрат времени и, в-третьих, из-за необходимости учета при расчетах этих затрат весьма сложных функций, описывающих поведение абонентов.

Решение общей задачи доставки информации корреспонденту, постановка которой сформулирована в [134, 137], предполагает учет всех факторов, определяющих время прохождения информации между корреспондентами, в том числе и связанных с подходом к телефонному аппарату при входящих и исходящих вызовах, а также ориентирование входящего вызова. Один из возможных методов учета этих факторов в математической модели процесса доставки информации описан в [90]. Для включения в указанную модель непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату необходимо знать математическое описание этих затрат, а также вероятность их отсутствия. При этом принимается, что воз-

можно осуществление только одного из двух несовместимых событий:

1) событие $Q$ — затрат на подход к телефонному аппарату нет, т. е. абоненты в момент поступления вызовов (входящих и исходящих) находятся в непосредственной близости от телефонного аппарата;

2) событие $P$ — затраты на подход к телефонному аппарату равны математическому ожиданию времени подхода.

Если событиям $Q$ и $P$ соответствуют вероятности $q$ и $p$, то

$$q + p = 1. \tag{3.16}$$

Принимается, что в течение рассматриваемого отрезка времени $T$ каждый абонент может находиться либо около телефонного аппарата, либо в пути между рабочим местом и местом установки телефонного аппарата, либо на своем рабочем месте. Тогда имеет место следующее нормирующее условие:

$$T_{\text{р}} + T_{\text{т}} + T_{\text{о}} = T, \tag{3.17}$$

где $T_{\text{р}}$ — время, в течение которого абонент находится на своем рабочем месте; $T_{\text{т}}$ — время, в течение которого абонент находится в месте размещения телефона; $T_{\text{о}}$ — время, в течение которого абонент находится в пути между рабочим местом и телефонным аппаратом.

Сложность заключается в том, что телефонным аппаратом может пользоваться не один, а $m$ абонентов. Поступивший в момент $t$ вызов $i$-му абоненту может застать его на произвольном расстоянии от телефонного аппарата. Поэтому величина затрат времени на подход к телефонному аппарату может колебаться в очень широких пределах.

Нахождение каждого абонента в произвольный момент времени в какой-либо точке пространства определяется целым комплексом социальных, психологических и других факторов, которые формируют функцию поведения абонента. Из-за зависимости непроизводительных затрат времени, связанных с подходом к телефонному аппарату, от функции поведения абонента невозможно определить величины этих затрат в общем виде. Эта задача становится определенной, если функцию поведения абонента свести к функции распределения случайной величины расстояния абонента до некоторой точки отсчета $l=0$, в которую помещен телефонный аппарат. Следовательно, поведение абонента сводится к его пространственному перемещению, характеристику которого можно рассматривать как чисто случайную величину. Таким образом, в соответствии с практикой пользования телефонной связью, мы никоим образом не связаны ни с конфигурацией территории, обслуживаемой телефонным аппаратом, ни с какими-либо иными пространственными характеристиками, кроме абсолютной величины расстояния от абонента до телефонного аппарата.

Распределение случайной величины расстояния абонента до телефонного аппарата может носить как дискретный, так и непрерывный характер. Дискретное распределение используется для описания ситуации, когда абонент может находиться в одной из конечного числа точек, которые будем называть «рабочим местом». Вероятность нахождения абонента не на рабочем месте мала, но не равна нулю, так как абоненты перемещаются с одного рабочего места на другое не мгновенно. В этом смысле строго дискретным распределение быть не может. Однако если переходы между рабочими местами заменить их математическим ожиданием, то эти переходы можно рассматривать как дополнительное (фиктивное) рабочее место. В соответствии с (3.17) при дискретном распределении

$$\sum_{i=1}^{n} p_i + p_т + p_о = 1, \tag{3.18}$$

где $p_i$ — вероятность нахождения абонента на $i$-м рабочем месте; $n$ — число рабочих мест (включая фиктивные); $p_т$ — вероятность нахождения абонента в точке, где расположен телефонный аппарат; $p_а$ — вероятность того, что абонент находится в пути между телефонным аппаратом и рабочими местами.

Аналогично этому

$$\sum_{i=1}^{n} t_i + T_т + T_о = T, \tag{3.19}$$

где $t_i$ — время пребывания абонента на $i$-м рабочем месте. Очевидно, что $p_i = t_i/T$.

При непрерывном распределении вероятностей предполагается, что абонент может находиться в любой точке интервала $0 \leqslant l \leqslant L_{макс}$, где $L_{макс}$ — расстояние от телефонного аппарата до наиболее удаленной от него точки, в которой может находиться абонент в течение отрезка времени продолжительностью $T$. Таким образом, при непрерывном распределении вероятностей рабочим местом является любая точка интервала $0 \leqslant l \leqslant L_{макс}$. Легко убедиться, что $\int_0^{L_{макс}} p(l)dl = 1$, где $p(l)$ — плотность распределения вероятности.

*Возвращение на рабочее место.* Непроизводительные затраты времени на подход к телефонному аппарату $T_о$ складываются из затрат на переход абонента из точки, в которой он находился в момент поступления входящего или возникновения исходящего вызова, к телефонному аппарату $t_а$ и затрат на переход абонента от телефонного аппарата после окончания разговора к одному из своих рабочих мест $t_б$. При осуществлении каждого вызова величины $t_а$ и $t_б$ принимают случайные значения, а следовательно, случайным образом изменяется и величина $T_о$. На основании известной

в теории вероятности теоремы о том, что математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме их математических ожиданий, имеем

$$T_o = t_a + t_б. \tag{3.20}$$

Рассмотрим вначале величину математического ожидания времени перехода от телефонного аппарата к своему рабочему месту. Когда абонент окончил разговор по телефонному аппарату, он может вернуться на любое из $n$ рабочих мест с соответствующими вероятностями $p_i$ (если распределение вероятностей дискретное) или в любую точку интервала $0 \leqslant l \leqslant L_{макс}$ (если распределение вероятностей непрерывное). Однако он совершит такой путь только в том случае, если за время этого перехода не поступит ни одного нового вызова.

Вначале предположим, что абонент всегда достигает своего рабочего места, т. е. за время перехода от телефонного аппарата до рабочего места новых вызовов не поступает. Математическое ожидание длины перехода в этом случае

$$M[l] = \sum_{i=1}^{n} p_i l_i = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i l_i \tag{3.21}$$

и для непрерывного распределения

$$M[l] = \int_0^{L_{макс}} p_i l_i dl = \frac{1}{T} \int_0^{L_{макс}} t_i l dl, \tag{3.21'}$$

где $l_i$ — расстояние от $i$-го рабочего места до телефона; $t_i$ — время пребывания на $i$-м рабочем месте.

Однако практически средняя длина перехода будет меньше величины $M[l]$, поскольку за время его осуществления может поступить новый вызов. Обозначим отрезок пути от телефонного аппарата до той точки, где абонента застанет новый вызов, через $x (0 \leqslant x \leqslant M[l])$. Отрезку пути $x$ соответствует отрезок времени $t_x = x/v$, где $v$ — средняя скорость перемещения абонента. В течение $t_x$ может поступить не один, а 2, 3 ... вызова, но это не оказывает влияния на длину пути абонента, так как, получив первый вызов, он немедленно возвращается к телефону. Математическое ожидание длины перехода от телефонного аппарата до точки, где абонента застанет новый вызов:

$$M[x] = \sum_{i=0}^{n} \int_0^{l_i} x dF(x/i, 1), \tag{3.22}$$

где $F(x/i, 1)$ — условная функция распределения случайной величины $x$ при условии, что при поступлении нового вызова абонент направлялся к рабочему месту с индексом $i$.

Так как функция $F(x/i, 1)$ характеризует вероятность совместного наступления двух независимых событий, то она является произведением двух вероятностей: вероятности того, что абонент направляется к рабочему месту с индексом $i$, и вероятности того, что абонент прошел до поступления нового вызова отрезок пути продолжительностью $x$, т. е.

$$F(x/i,\ 1) = p_i \frac{x}{l_i}\ .$$

Тогда

$$\frac{dF(x/i,\ 1)}{dx} = \frac{p_i}{l_i}\ .$$

Отсюда

$$M[x] = \sum_{i=1}^{n} \int_0^{l_i} x \frac{p_i}{l_i} dx = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^{n} t_i l_i = \frac{1}{2} M[l] \qquad (3.22')$$

и для непрерывного распределения

$$M[x] = \frac{1}{2T} \int_0^{L_{\text{макс}}} t_i l dl = \frac{1}{2} M[l]. \qquad (3.22'')$$

Математические ожидания длины перехода от телефонного аппарата до рабочего места $M[l]$ и $M[x]$ относятся к одному вызову при условии, что этот вызов уже состоялся. Математическое ожидание числа вызовов, поступивших за рассматриваемый отрезок времени продолжительностью $T$, при пуассоновском входящем потоке равно $\lambda T$, где $\lambda$ — интенсивность потока. Учитывая, что математическое ожидание произведений случайных величин равно произведению их математических ожиданий, получим

$$M[l_6] = \lambda T M[l_{6,1}], \qquad (3.23)$$

где $M[l_{6,1}]$ — математическое ожидание случайной длины перехода, отнесенной к одному вызову.

Для определения величины $M[l_{6,1}]$ рассмотрим полную группу следующих несовместимых событий:

событие $B_0$ — за отрезок времени $t_l = M[l]/v$, необходимый для осуществления перехода от телефонного аппарата до рабочего места, новые вызовы не поступили ($v$ — средняя скорость передвижения абонента к телефону);

событие $B_1$ — за отрезок времени $t_l$, необходимый для осуществления перехода от телефонного аппарата до рабочего места, поступил хотя бы один вызов.

Вероятности указаниых событий соответственно равны:

$$P(B_0) = e^{-\lambda t_l}; \qquad (3.24)$$

$$P(B_1) = 1 - P(B_0) = 1 - e^{-\lambda t_l}. \qquad (3.24')$$

Событию $B_0$ соответствует длина перехода протяженностью $M[l]$; событию $B_1$ — продолжительностью $M[x]$. В этих обозначениях

$$M[l_{б.\,1}] = P(B_0)\,M[l] + P(B_1)\,M[x] = \frac{1}{2}M[l]\left(1 + e^{-\frac{\lambda}{v}M[l]}\right); \quad (3.25)$$

$$M[l_б] = \frac{1}{2}\lambda TM[l]\left(1 + e^{-\frac{\lambda}{v}M[l]}\right). \quad (3.25')$$

Анализ (3.25′) показывает, что величина $M[l_б]$ стремится к нулю при $\lambda \to 0$ (абонент постоянно находится на своем рабочем месте) и $\lambda \to \infty$ (абонент постоянно находится около телефонного аппарата). Последнее утверждение не очевидно, но оно следует из того, что за конечный отрезок времени $T$ может поступить конечное количество вызовов. Поэтому при рассмотрении предела

$$\lim_{\lambda\to\infty} M[l_б] = \lim_{\lambda\to\infty}\frac{1}{2}\lambda TM[l] + \lim_{\lambda\to\infty}\frac{1}{2}\lambda TM[l]\,e^{-\frac{\lambda}{v}M[l]}$$

выделим первое слагаемое, которое после преобразования примет вид

$$\lim_{\lambda\to\infty}\frac{1}{2}\lambda TM[l] = \lim_{\lambda\to\infty}\frac{1}{2}\lambda\sum_{i=0}^{n} t_i l_i.$$

Однако, как будет показано ниже, при очень большом $\lambda$ все величины $t_i$ стремятся к нулю. Раскрытие неопределенности вида $\infty\cdot 0$ позволяет установить, что этот предел стремится к нулю.

Второе слагаемое в формуле для $\lim M[l_б]$ содержит неопределенность вида $0\cdot\infty$. После преобразования к виду $\infty/\infty$ получим

$$\lim_{\lambda\to\infty}\frac{1}{2}\lambda TM[l]\,e^{-\frac{\lambda}{v}M[l]} = \lim_{\lambda\to\infty}\frac{\frac{1}{2}\lambda TM[l]}{e^{+\frac{\lambda}{v}M[l]}};$$

применяя правило Лопиталя окончательно имеем

$$\lim_{\lambda\to\infty}\frac{\frac{1}{2}TM[l]}{\frac{M[l]}{v}e^{\frac{\lambda}{v}M[l]}} = 0.$$

Следовательно, $\lim\limits_{\lambda\to\infty} M[l_б] = 0$. Отметим, что при $\lambda \to 0$ $\lim\limits_{\lambda\to 0} M[l_{б.\,1}] = M[l]$, т. е. при малом $\lambda$ абонент беспрепятственно вернется на свое рабочее место после состоявшегося разговора.

Таким образом, получаем

$$t_б = \frac{M[l_б]}{v} = \frac{\lambda T}{2v}M[l]\left(1 + e^{-\frac{\lambda}{v}M[l]}\right). \quad (3.26)$$

*Время собственно подхода к телефонному аппарату.* Назовем событием $A_i$ пребывание абонента в данный момент времени в точке, находящейся на расстоянии $l_i$ от телефонного аппарата. Вероятность того, что этот абонент совершит подход к телефонному аппарату, равна вероятности поступления входящего или возникновения исходящего вызова при условии, что событие $A_i$ произошло.

Вероятность того, что будет совершено 2, 3, ..., $k$ подходов, равна вероятности поступления 2, 3, ..., $k$ вызовов. Если входящий поток вызовов пуассоновский, то условное распределение моментов появления вызовов равномерно в отрезке времени $t_i$ и эти моменты независимы между собой. В соответствии с определением математического ожидания:

$$M[l_a/A_i] = \sum_{k=0}^{K} k l_t P_k(t_i), \tag{3.27}$$

где $P_k(t_i)$ — вероятность поступления $k$ вызовов в отрезок времени $t_i$.

Верхний предел суммирования $K$ не может быть равен бесконечности, так как отрезок времени $t_i$ конечен. Вероятность события $A_i$ равна $p_i$. Следовательно,

$$M[l_a] = \sum_{i=1}^{n} p_i M[l_a/A_i] = \sum_{i=1}^{n} p_i \sum_{k=0}^{K} k l_t P_k(t_i). \tag{3.28}$$

Для пуассоновского входящего потока

$$P_k(t_i) = \frac{(\lambda t_i)^k}{k!} e^{-\lambda t_i},$$

поэтому

$$M[l_a] = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} l_t t_i e^{-\lambda t_i} (\lambda t_i) \sum_{k=0}^{K} \frac{(\lambda t_i)^{k-1}}{(k-1)!} \approx \frac{\lambda}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_t e^{-\lambda t_i} e^{\lambda t_i} =$$

$$= \frac{\lambda}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i. \tag{3.29}$$

Формула (3.29) справедлива при малых величинах $\lambda$, когда вероятность поступления новых вызовов за время нахождения абонента в пути от телефонного аппарата очень мала.

При малых величинах $\lambda$ все подходы к телефонному аппарату абонент осуществляет со своих рабочих мест. Если $\lambda$ достаточно велика, то становится заметной вероятность появления новых вызовов во время пути абонента от телефонного аппарата. Естественно, что при этом сокращается и протяженность подхода. Аналогично вышеописанному имеем

$$M[l_a] = P(B_0) \frac{\lambda}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_t + P(B_i) M[x] \lambda T.$$

После преобразований получим

$$M[l_a] = \frac{\lambda T}{2}\left\{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i + \left[\frac{2\sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i}{T^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i}{T}\right] e^{-\frac{\lambda}{vT}\sum_{i=1}^{n} t_i\, l_i}\right\} \quad (3.29')$$

и время подхода к телефонному аппарату

$$t_a = \frac{M[l_a]}{v} = \frac{\lambda T}{2v}\left\{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i + \left[\frac{2\sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i}{T^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i}{T}\right] e^{-\frac{\lambda}{vT}\sum_{i=1}^{n} t_i\, l_i}\right\}. \quad (3.30)$$

Для непрерывного распределения

$$M[l_a] = \int_0^{L_{макс}} p_i M[l_a/A] = \frac{1}{T}\int_0^{L_{макс}} t_i \sum_{k=0}^{K} k l_i P_k(t_i).$$

При пуассоновском входящем потоке и малой величине $\lambda$

$$M[l_a] = \frac{1}{T}\int_0^{L_{макс}} t_i \sum_{k=0}^{\infty} k l_i \frac{(\lambda t_i)^k}{k!} e^{-\lambda t_i} dl = \frac{\lambda}{T}\int_0^{L_{макс}} t_i^2 l dl.$$

Если $\lambda$ достаточно велика,

$$M[l_a] = \frac{\lambda T}{2}\left\{\int_0^{L_{макс}} t_i l dl + \left[\frac{2}{T^2}\int_0^{L_{макс}} t_i^2 l dl - \frac{1}{T}\int_0^{L_{макс}} t_i l dl\right]\times\right.$$

$$\left.\times\, e^{-\frac{\lambda}{vT}\int_0^{L_{макс}} t_i l dl}\right\}.$$

*Суммарная величина непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату.* Собрав все полученные результаты, на основе (3.20) имеем:

$$T_o = \frac{\lambda T}{2v}\left\{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i + \left[\frac{2\sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i}{T^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i l_i}{T}\right] e^{-\frac{\lambda}{vT}\sum_{i=1}^{n} t_i\, l_i}\right\} +$$

$$+ \frac{\lambda T}{2v}\sum_{i=1}^{n} t_i l_i\left[1 + e^{-\frac{\lambda}{v}\sum_{i=1}^{n} t_i\, l_i}\right].$$

Отсюда

$$T_o = \frac{\lambda T}{v}\left[\sum_{i=1}^{n} t_i l_i + \frac{1}{T^2}\sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i e^{-\frac{\lambda}{vT}\sum_{i=1}^{n} t_i t_i}\right]. \qquad (3.31)$$

Если $n=1$, то $\sum_{i=1}^{n} t_i l_i = L$, где $L$ — математическое ожидание расстояния от рабочего места абонента до телефона. При этом $t_i \to T = 1$. Тогда

$$T_o = \frac{\lambda L}{v}\left[1 + e^{-\frac{\lambda}{v} L}\right]. \qquad (3.31')$$

Если при этом величина $\lambda L/v$ мала, получим

$$T_o = \frac{2\lambda L}{v}. \qquad (3.31'')$$

На рис. 3.11 представлены зависимости величины $T_o$ от $\lambda L/v$, построенные по ф-лам (3.31′) и (3.31″). Из рисунка следует, что

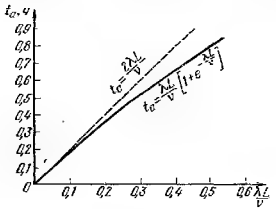



Рис. 3.11. Зависимость математического ожидания непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату от расстояния, интенсивности потока вызовов и скорости перемещения абонента

более простая ф-ла (3.31″) может использоваться с достаточной степенью точности при $\frac{\lambda L}{v} < 0{,}1$ или, учитывая, что $v = \text{const} = 4000$ м/ч, при $\lambda L < 400$.

Допустим, что телефонным аппаратом пользуется не один, а $m$ абонентов, причем

$$T_o = \sum_{j=1}^{m} T_{oj}. \qquad (3.32)$$

Произведя подстановку, получим

$$T_o = \sum_{j=1}^{m} \frac{\lambda_j T}{v}\left[\sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} l_{ij} + \frac{1}{T^2}\sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}^2 l_{ij} e^{-\frac{\lambda_j}{vT}\sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} t_{ij}}\right]. \qquad (3.32')$$

Если каждый абонент имеет только одно рабочее место, т. е. если $n_j = 1$, то, принимая $T$ за единицу, имеем следующую упрощенную формулу:

$$T_o = \sum_{j=1}^{m} \frac{\lambda_j}{v} \left[1 + e^{-\frac{\lambda_j}{v} L_j}\right]$$

и при малых $\frac{\lambda_j L_j}{v}$

$$T_o = \sum_{j=1}^{m} \frac{2\lambda_j L_j}{v}.$$

Наконец, если все абоненты идентичны, то в соответствии с (3.32)

$$T_o = \frac{m\lambda L}{v}\left[1 + e^{-\frac{\lambda L}{v}}\right] \text{ при } t_i \to T;\ T - 1$$

или

$$T_o = \frac{2m\lambda L}{v} \text{ при } e^{-\frac{\lambda L}{v}} \to 1.$$

Практически при $m > 1$ условие (3.32) может не выполняться, так как поведение каждого абонента не является независимым от поведения других абонентов. Характер возникающих при этом зависимостей требует специальных исследований. Можно предполагать, что ф-ла (3.32) в данном случае выражает верхний предел величины непроизводительных затрат.

*Среднее время пребывания абонента возле телефона.* До сих пор входящие и исходящие вызовы рассматривались совместно. Однако входящие и исходящие вызовы не эквивалентны, когда мы рассматриваем время пребывания абонента возле телефонного аппарата. Допустим, что в отрезок времени $T$ абонент осуществляет исходящие вызовы с интенсивностью $\lambda_{исх}$ и продолжительностью $T_п$ каждый, а к нему поступают входящие вызовы с интенсивностью $\lambda_{вх}$ и той же продолжительностью. Из теории вероятностей известно, что если общий поток пуассоновский, то и составляющие его потоки также являются пуассоновскими. Поэтому математическое ожидание величины общего потока вызовов, поступающих на телефонный аппарат,

$$\lambda = \lambda_{исх} + \lambda_{вх}. \tag{3.33}$$

При исходящих вызовах абонент, кроме $T_и$, затрачивает время $T_п$ на осуществление требуемого соединения. Тогда математическое ожидание времени пребывания абонента возле телефонного аппарата при пользовании им равно

$$T_в = (\lambda T_и + \lambda_{исх} T_п) T. \tag{3.34}$$

Величина $T$ здесь и ранее должна выбираться, исходя из условия обеспечения стационарности потока вызовов, без чего нельзя говорить о пуассоновском входящем потоке требований. Обычно в качестве отрезка $T$ принимается час наибольшей нагрузки.

Если число абонентов, пользующихся телефонным аппаратом, равно $m$ ($m>1$) и все они создают одинаковый поток вызовов, то

$$T_{\text{т}} = (\lambda T_{\text{в}} + \lambda_{\text{исх}} T'_{\text{п}}) mT. \qquad (3.34')$$

В ф-лах (3.34) и (3.34′) величины интенсивностей потоков отнесены к одному абоненту.

*Время пребывания на рабочем месте.* На основании ф-лы (3.19) имеем

$$\sum_{i=1}^{n} t_i = T - [T_{\text{т}} + T_0].$$

В левой части этого равенства стоит суммарное время пребывания абонента на своих рабочих местах в течение отрезка времени $T$. С возрастанием $T_{\text{т}}$ и $T_0$ это время уменьшается.

Если за время пребывания абонента на $i$-м рабочем месте вызовов не поступает, он будет находиться на этом месте в течение отрезка времени $t_i$. Вероятность такого события равна $e^{-\lambda t_i}$.

Обозначим математическое ожидание времени собственно подхода к телефонному аппарату, разговора и возвращения на $i$-е рабочее место, отнесенное к одному вызову, через $t_{1\,r}$, т. е. на основе (3.31):

$$t_{1\,r} = \frac{1}{\nu}\left[\sum_{i=1}^{n} t_i l_i + \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 l_i}{T^2} e^{\frac{\lambda}{\nu T}\sum_{i=1}^{n} t_i\, t_i}\right] + T_{\text{в}}.$$

Допустим, что $t_i$ — отрезок времени интервала $T$, в течение которого абонент находился бы на своем рабочем месте, если бы не было телефонного аппарата. Тогда при установке аппарата и поступлении за время $t_i$ ровно одного вызова время пребывания абонента на рабочем месте сократится до величины $t_i - t_{1-r}$. Вероятность такого события равна $\lambda(t_i - t_{1-r}) e^{-\lambda(t_i - t_{1-r})}$. При поступлении двух вызовов время пребывания абонента на $i$-м рабочем месте составит $t_i - 2t_{1\,r}$, а вероятность такого события равна

$$\frac{\lambda^2 (t_i - 2t_{1-r})^2}{2!} e^{-\lambda(t_i - 2t_{1-r})}.$$

Рассуждая дальше таким же образом, получим

$$M[t_i] = t_i e^{-\lambda t_i} + (t_i - t_{1-r}) \frac{\lambda (t_i - t_{1-r})}{1!} e^{-\lambda(t_i - t_{1-r})} +$$

$$+(t_i-2t_{1-r})\frac{\lambda^2(t_i-2t_{1-r})^2}{2!}e^{\lambda(t_i-2t_{1-r})}+\cdots+$$

$$+(t_i-kt_{1-r})\frac{\lambda^k(t_i-kt_{1-r})^k}{k!}e^{-\lambda(t_i-kt_{1-r})}. \qquad (3.35)$$

В приведенной формуле количество членов ряда определяется величиной $k$, которая ограничивается целой частью отношения

$$k\leqslant\left[\frac{t_i}{t_{1-r}}\right].$$

Отсюда следует, что $k$-й член ряда (3.35) равен нулю. Поэтому

$$T_r=M[t_i]-e^{-\lambda t_i}\sum_{j=0}^{k-1}\frac{\lambda^j}{j!}(t_i-jt_{1-r})^{j+1}e^{j\lambda t_{1-r}}. \qquad (3.35')$$

Ряд (3.35′) быстро сходится, так как первый его член равен $t_i$, а последний стремится к нулю. При одном из малых $j$ эта функция имеет максимум. Из ф-лы (3.35) следует, что при $\lambda=0$ $M[t_i]=t_i$, а при $\lambda\to\infty$ $M[t_i]\to 0$.

Если абонент может находиться только на одном рабочем месте, то $t_i=1$. и ф-ла (3.35′) приобретает вид

$$T_r=e^{-\lambda t_i}\sum_{j=1}^{k-1}\frac{\lambda^j}{j!}(t_i-jt_{1-r})^{j+1}e^{j\lambda t_{1-r}}. \qquad (3.35'')$$

*Вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату.* Для более полной характеристики непроизводительных затрат времени, связанных с подходом к телефонному аппарату, необходимо определить вероятность наступления события $Q$ – отсутствия этих затрат.

При возникновении исходящего вызова абонент не затрачивает времени на подход к телефонному аппарату в течение всего времени пребывания возле аппарата, а также в том случае, если он уже находится на пути к аппарату для осуществления предыдущего (безразлично, входящего или исходящего) разговора. Поэтому вероятность отсутствия затрат времени на подход к телефонному аппарату при исходящем вызове

$$q_0=\lambda_{\text{исх}}\left[\frac{t_{i=0}}{T}+\lambda TT_{\text{и}}+\lambda_{\text{исх}}TT_{\text{п}}\right]+\lambda t_{0\text{а}}P_{\text{исх}}(1,\ t_{0\text{а}}), \qquad (3.36)$$

где $P_{\text{исх}}(1, t_{0\text{а}})$ — вероятность поступления одного исходящего вызова за отрезок времени $t_{0\text{а}}$, когда абонент направляется к телефонному аппарату, $P_{\text{исх}}(1, t_{0\text{а}})=\lambda_{\text{исх}}t_{0\text{а}}e^{-\lambda_{\text{исх}}t_{0\text{а}}}$; $t_{i=0}$ – время пребывания абонента на рабочем месте, совпадающем с местоположением телефона.

После подстановки получим

$$q_0=\lambda_{\text{исх}}\left[\frac{t_{i=0}}{T}+\lambda TT_{\text{и}}+\lambda_{\text{исх}}TT_{\text{п}}\right]+\frac{\lambda\lambda_{\text{исх}}}{\nu^2}[M[l]]^2e^{-\frac{\lambda_{\text{исх}}}{\nu}M[l]}. \qquad (3.36')$$

### Ожидание освобождения телефонного аппарата вызывающего абонента

Время ожидания освобождения на исходящем конце телефонного аппарата от ведения предыдущего разговора зависит от величины нагрузки, создаваемой одним абонентом $y$, и числа абонентов $m$, пользующихся этим аппаратом. С точки зрения величины создаваемой нагрузки в чнн все абоненты принимаются эквивалентными.

Телефонный аппарат одновременно может обслуживать только один вызов. Если в момент поступления очередного вызова телефонный аппарат свободен, то вызов начинает обслуживаться немедленно. Если же в указанный момент телефонный аппарат занят, то обслуживание поступившего вызова задерживается до момента освобождения аппарата. В этом случае образуется очередь, состоящая из одного требования. Если в рассматриваемой сети одновременно находятся 3, 4, ..., $m$ вызовов, длина очереди соответственно составляет 2, 3, ..., $(m-1)$ вызовов.

Телефонный аппарат и $m$ потребителей входящих и исходящих сообщений, передаваемых с его помощью, образуют систему без потерь, так как ни один поступивший вызов не окажется необслуженным. Некоторые вызовы будут обслужены незамедлительно (если телефонный аппарат в момент их поступления свободен), а другие задерживаются до момента освобождения телефонного аппарата. Поэтому рассматриваемая система является системой с ожиданием, причем число источников нагрузки конечно (т. е. $m<\infty$).

Продолжительность нахождения вызова, сообщения и т. д. в рассматриваемой системе есть случайная величина. Примем, что она подчиняется показательному закону распределения, т. е.

$$P(\xi<t) = 1 - e^{-\frac{t}{t_1}},$$

где $t$ — текущая координата времени; $t_1$ — математическое ожидание времени обслуживания вызова (нахождения требования в системе).

В любой момент времени в системе может одновременно находиться $k$ требований ($k \leqslant m$). В данном случае конкретная реализация процесса поступления вызовов может быть охарактеризована одним числом — количеством поступивших вызовов (требований, заявок, сообщений и т. п.), которое и определяет состояние рассматриваемой системы. Поскольку число источников $m$, создающих вызовы (как входящие, так и исходящие), конечно, возможно $m+1$ состояние данной системы (табл. 3.7).

Каждому состоянию системы соответствует определенная вероятность. Обозначим через $p_k$ вероятность того, что в системе в данный момент времени находится ровно $k$ вызовов (при этом $k-1$ вызовов образуют очередь). Нетрудно видеть, что вероят-

Таблица 3.7

СОСТОЯНИЕ СЕТИ СВЯЗИ С ОДНИМ ОБСЛУЖИВАТЕЛЕМ

| №№ состояний | 0 | 1 | 2 | 3 | . . . | $k$ | . . . | $m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число поступивших вызовов | 0 | 1 | 2 | 3 | . . . | $k$ | . . . | $m$ |
| Число вызовов, ожидающих обслуживания (очередь) | 0 | 0 | 1 | 2 | . . . | $k-1$ | . . . | $m-1$ |

ности $p_k$ и являются вероятностями состояний, в которых может находиться система. Поскольку система обязательно находится в одном из своих состояний, имеет место равенство

$$\sum_{k=0}^{m} p_k = 1. \qquad (3.37)$$

Ожидание освобождения занятого телефонного аппарата на исходящем конце будет охарактеризовано, если будут известны математическое ожидание времени ожидания данного вида $t_1$, вероятность отсутствия ожидания данного вида $q_1$ и вероятность наличия непроизводительных затрат времени из-за ожидания этого вида $p_1$. Последние две вероятности вследствие сделанного допущения о том, что абонент не откажется от соединения вне зависимости от продолжительности ожидания или каких-либо других факторов, связаны соотношением

$$q_1 = 1 - p_1. \qquad (3.38)$$

В рассматриваемой системе время ожидания освобождения занятого телефонного аппарата равно времени ожидания начала обслуживания, так как по условию поступивший вызов немедленно обслуживается после освобождения телефонного аппарата от ведения предшествующей передачи информации. В свою очередь, математическое ожидание времени ожидания начала обслуживания равно математическому ожиданию числа вызовов, ожидающих начала обслуживания. Это равенство вытекает из того факта, что в любой момент времени в системе находится $k-1$ ожидающих вызовов. Поэтому математическое ожидание числа вызовов, ожидающих начала обслуживания (или, что тоже самое, математическое ожидание длины очереди), выраженное в долях от рассматриваемого интервала времени (например, чин), является средним временем начала обслуживания вызовов, поступивших в систему

в течение этого интервала. Тогда по определению математического ожидания

$$M[k,\ T] = T_1 = \sum_{k=1}^{m} (k-1)\, p_k, \tag{3.39}$$

где $M[k, T]$ — математическое ожидание числа вызовов, поступивших в систему в течение интервала времени $T$ и ожидающих начала обслуживания; $T_1$ — математическое ожидание общих затрат времени на ожидание освобождения телефоиного аппарата от ведения предыдущей передачи информации, выражеиное в долях от $T$.

Найдем выражения для вероятностей $P_k$. Обозначим через $P_k(t)$ вероятность того, что в системе в момент времени находится ровно $k$ вызовов, а через $P_{ik}(\Delta t)$ — условную вероятность того, что через время $\Delta t$ в рассматриваемой системе будет $k$ вызовов, если в момент времени $t$ их было $i$. Вероятность того, что к моменту времени $t+\Delta t$ в системе будет $k$ вызовов, если в момент времени $t$ их было $i$, по формуле полной вероятности равна

$$P_k(t+\Delta t) = \sum_{i=0}^{m} P_i(t)\, P_{ik}(\Delta t). \tag{3.40}$$

Вычислим вероятности $P_{ik}(\Delta t)$ перехода системы из состояния $i$ в состояние $k$ за время $\Delta t$. Вначале допустим, что $|i-k| \leqslant 1$. Тогда к моменту времени $t+\Delta t$ в системе могут находиться $k$ вызовов только в следующих случаях:

а) в момент времени $t$ было $i=k$ вызовов и за время $\Delta t$ не поступило нового вызова и не завершился ни один из имеющихся;

б) в момент времени $t$ в системе было $i=k+1$ вызовов и за время $\Delta t$ один из них закончился;

в) в момент времени $t$ в системе было $i=k-1$ вызовов и за время $\Delta t$ поступил еще один новый вызов

Вероятность осуществления случая а) равна по теореме произведений вероятностей произведению вероятности того, что из $m-k$ возможных вызовов за время $\Delta t$ в систему в действительности не поступит ни одного, и вероятности того, что за время $\Delta t$ не будет окончено обслуживание вызова:

$$P_{kk}(\Delta t) = [1 - W_1(\Delta t)]^{m-k}\, W_0(\Delta t), \tag{3.41}$$

где $W_1(\Delta t)$ — вероятность поступления одного требования в течение времени $\Delta t$; $W_0(\Delta t)$ — вероятность того, что за время $\Delta t$ не будет окончено обслуживание вызова.

Исходя из свойств простейшего потока $W_1(\Delta t) \approx \lambda \Delta t$; $W_0(\Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{T}} = 1 - \frac{\Delta t}{T}$. При этом принимается, что вследствие ординарности потока вероятность того, что появится больше одного требования за малый промежуток времени $\Delta t$, есть бесконечно малая величина более высокого порядка, чем $\Delta t$. Поэтому вероятности $W_n(\Delta t)$ в степени выше первой представляют собой бесконечно малые величины. С учетом этих обстоятельств

$$P_{kk}(\Delta t) = 1 - \lambda (m-k)\, \Delta t - \frac{\Delta t}{T}. \tag{3.41'}$$

Из (3.41') получим (с точностью до бесконечно малых):

$$P_{00}(\Delta t) = [1 - W_1(\Delta t)]^m\, W_0(\Delta t)^0 = 1 - \lambda m \Delta t; \tag{3.41''}$$

$$P_{mm}(\Delta t) = [1 - W_1(\Delta t)]^0\, W_0(\Delta t)^m = 1 - m\, \frac{\Delta t}{T}. \tag{3.41'''}$$

Ситуация б) соответствует переходу системы из состояния $k$ в состояние $k-1$. Вероятность этого перехода с точностью до бесконечно малых высшего порядка по сравнению с $\Delta t$ равна произведению вероятностей того, что за время $\Delta t$ будет закончено обслуживание находившегося в системе вызова, и того, что за этот отрезок времени не поступит ни одного из $m-k$ требований. Следовательно,

$$P_{k,\,k-1} = C_k^1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right)\left(e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right)^k [1 - \lambda\,\Delta t]^{m-k}.$$

После преобразований с учетом свойств простейшего потока

$$P_{k,\,k-1} = k\,\frac{\Delta t}{T}\left[1 - (k-1)\,\frac{\Delta t}{T}\right][1 - \lambda\,(m-k)\,\Delta t] =$$

$$= k\,\frac{\Delta t}{T}[1 - \lambda\,(m-k)\,\Delta t]$$

и окончательно

$$P_{k,\,k-1} = k\,\frac{\Delta t}{T}. \qquad (3.42)$$

Ситуация в) соответствует переходу системы из состояния $k$ в состояние $k+1$. Вероятность этого перехода с точностью до бесконечно малых высшего порядка по сравнению с $\Delta t$ равна произведению вероятностей того, что за время $\Delta t$ в систему поступит одно из $m-k$ возможных требований ($C_{m-k}^1 \lambda \Delta t$), и того, что за время $\Delta t$ не будет закончено обслуживание находившегося в системе вызова $\left(e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right)$. Тогда

$$P_{k,\,k+1} = C_{m-k}^1 \lambda\,\Delta t\, e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \lambda\,(m-k)\,\Delta t\left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right).$$

Отсюда

$$P_{k,\,k+1} = \lambda\,(m-k)\,\Delta t. \qquad (3.43)$$

Вероятность перехода системы из состояния $i$ в состояние $k$, когда $|i-k| \geqslant 2$, за время $\Delta t$ есть бесконечно малая величина более высокого порядка, чем $\Delta t$. Это можно показать следующим образом.

Вероятность поступления двух требований за время $\Delta t$ по теореме умножения вероятностей равна

$$[\lambda\,\Delta t + o(\Delta t)]^2 = (\lambda\,\Delta t)^2 + 2\lambda\,\Delta t + [o(\Delta t)]^2 = o(\Delta t),$$

где $o(\Delta t)$ — бесконечно малая величина по сравнению с $\Delta t$.

Нетрудно видеть, что вероятность поступления более двух вызовов за время $\Delta t$ тем более является бесконечно малой величиной более высокого порядка, чем $\Delta t$. Вероятность того, что за время $\Delta t$ будет обслужено два вызова (закончено обслуживание вызова, находившегося в системе в момент $t$, и полностью обслужен следующий за ним один вызов), равна

$$\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right)^2 = \left[\frac{\Delta t}{T} + o(\Delta t)\right]^2 = o(\Delta t).$$

Тем более бесконечно мала по сравнению с величиной $\Delta t$ вероятность того, что система за отрезок времени $\Delta t$ обслужит три и более вызовов.

Таким образом, ф-лы (3.41)—(3.43) с точностью до бесконечно малых высших порядков характеризуют вероятности переходов в рассматриваемой системе. На основании ф-лы (3.40) имеем:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)\,P_{00}(\Delta t) + P_1(t)\,P_{10}(\Delta t);$$

$$P_k(t + \Delta t) = P_{k-1}(t)\,P_{k-1,\,k}(\Delta t) + P_k(t)\,P_{kk}(\Delta t) +$$

$$+ P_{k+1}(t)\,P_{k+1,\,k}(\Delta t);$$

$$P_m(t+\Delta t) = P_{m-1}(t)\, P_{m-1,\, m}(\Delta t) + P_m(t)\, P_{mm}(\Delta t).$$

Используя полученные выше выражения для $P_{ik}(\Delta t)$, получим:

$$\left.\begin{aligned}
&P_0(t+\Delta t) = P_0(t)\,[1-\lambda m \Delta t] + P_1(t)\,\frac{\Delta t}{T}\ ;\\
&P_k(t+\Delta t) = P_{k-1}(t)\,\lambda(m-k+1)\,\Delta t + P_k(t)\left[1-\lambda(m-k)\,\Delta t - \frac{\Delta t}{T}\right] +\\
&\qquad + P_{k+1}(t)\,(k+1)\,\frac{\Delta t}{T}\ ;\\
&P_m(t+\Delta t) - P_{m-1}(t)\,\lambda\,\Delta t + P_m(t)\left[1-\frac{\Delta t}{T}\right].
\end{aligned}\right\}$$

Получаем конечную систему уравнений. После элементарных преобразований приходим к следующей системе:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{P_0(t+\Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda m P_0(t) + \frac{P_1(t)}{T}\ ;\\
&\frac{P_k(t+\Delta t) - P_k(t)}{\Delta t} = \lambda(m-k+1)\,P_{k-1}(t) - \left[\lambda(m-k) + \right.\\
&\qquad\qquad \left. + \frac{1}{T}\right] P_k(t) + \frac{1}{T}\,P_{k+1}(t);\\
&\frac{P_m(t+\Delta t) - P_m(t)}{\Delta t} = \lambda\,P_{m-1}(t) - \frac{1}{T}\,P_m(t).
\end{aligned}\right\}$$

При переходе к пределу $\Delta t \to 0$ в левой части находятся производные, т. е.

$$\left.\begin{aligned}
&P_0'(t) = -\lambda m P_0(t) + \frac{P_1(t)}{T}\ ;\\
&P_k'(t) = \lambda(m-k+1\,P_{k-1}(t) - \left[\lambda(m-k) + \frac{1}{T}\right] P_k(t) + \frac{1}{T}\,P_{k+1}(t);\\
&P_m'(t) - \lambda\,P_{m-1}(t) - \frac{1}{T}\,P_m(t).
\end{aligned}\right\}$$

Данная система дифференциальных уравнений может быть решена одним из известных методов. Однако, принимая во внимание, что нам нужно определить стационарное решение (в установившемся режиме), можно свести эту систему дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. Для этого перейдем к пределу при $t \to \infty$, что характеризует установившийся режим. Тогда $\lim\limits_{t\to\infty} P_k(t) = p_k$, где $p_k$ — вероятность наличия в системе $k$ вызовов, которая не зависит от начального состояния системы. По смыслу величин $P_k(t)$ и понятия производной $\lim\limits_{t\to\infty} P_k'(t) = 0$. Поэтому пределы левых частей системы уравнений равны нулю. Следовательно, в пределе при $t \to \infty$

$$\left.\begin{aligned}
&0 = -\lambda m p_0 + \frac{1}{T}\,p_1\\
&0 = \lambda(m-k+1)\,p_{k-1} - \left[\lambda(m-k) + \frac{1}{T}\right] p_k + \frac{1}{T}\,p_{k+1}\\
&0 = \lambda\,p_{m-1} - \frac{1}{T}\,p_m
\end{aligned}\right\}. \qquad (3.44)$$

Если выразить все $p_k$ ($k=1, 2, \ldots, m$) через $p_0$, то решением системы алгебраических ур-ний (3.44) будет

$$p_k = \frac{m!}{(m-k)!}(y)^k p_0. \tag{3.45}$$

Для определения величины $p_0$ необходимо использовать условие (3.37), из которого с учетом ф-лы (3.45) следует

$$\sum_{k=0}^{m} p_k = p_0 + \sum_{k=1}^{m} \frac{m!}{(m-k)!}(y)^k p_0 - p_0\left[1 + \sum_{k=1}^{m} \frac{m!}{(m-k)!}(y)^k\right] = 1.$$

Отсюда

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{m} \frac{m!}{(m-k)!}(y)^k}. \tag{3.46}$$

Математическое ожидание затрат времени на ожидание занятого телефонного аппарата на исходящем конце в соответствии с (3.39) равно

$$T_1 = \sum_{k=1}^{m}(k-1)p_k = \sum_{k=1}^{m}(k-1)\frac{m!}{(m-k)!}(y)^k p_0, \tag{3.47}$$

где $p_0$ определяется по ф-ле (3.46).

Математическое ожидание затрат времени данного вида, отнесенное к одному вызову:

$$t_1 = \frac{T_1}{\lambda m} = \sum_{k=1}^{m} \frac{k-1}{\lambda}\frac{(m-1)!}{(m-k)!}(y)^k p_0. \tag{3.47'}$$

Подчеркнем, что величины $T_1$ и $t_1$ выражаются в долях времени интервала $T$. Если $T=1$ ч, то эти величины измеряются в долях часа.

Вероятность того, что затрат времени на ожидание освобождения занятого телефонного аппарата не будет, равна сумме двух вероятностей — того, что вызовов вообще нет, и того, что в системе обслуживается один вызов, но ожидающих не имеется, т. е.

$$q_1 = p_0 + p_1 = p_0 + \frac{m!}{(m-1)!} y p_0 = (1 + my)p_0. \tag{3.48}$$

Вероятность наличия затрат этого вида находится из (3.38).

Таким образом, ф-лы (3.38), (3.46), (3.47') и (3.48) позволяют полностью учесть ожидание освобождения занятого телефонного аппарата в модели процесса доставки информации по сети АТС.

В тех случаях, когда условие (3.38) не выполняется, отказы от попытки установить соединение из-за необходимости ожидания освобождения занятого средства связи будут возникать в том случае, если число ожидающих превышает $r(r \geqslant 1)$. Вероятность отказа $p_{1_{\text{об}}}$ абонента от установления соединения по рассматриваемой причине может быть определена по формуле:

$$p_{1_{\text{об}}} = \frac{\sum_{k=r+2}^{m} \frac{m!}{(m-k)!} y^k}{1 + my + \sum_{k=2}^{m} \frac{m!}{(m-k)!} y^k}.$$

Например, если $r-2$, то отказы могут иметь место только при $m \geqslant 4$. В случае, когда учитываются три возможных состояния сети связи, вероятность того, что будут затраты времени на ожидание, равна сумме вероятностей того, что при занятом средстве связи имеются 1, 2, ..., $r$ ожидающих. Отсюда

$$p_1 \quad \frac{\sum_{k=2}^{r+1} \frac{m!}{(m-k)!} y^k}{1 + my \quad \sum_{k=2}^{m} \frac{m!}{(m \quad k)!} y^k}.$$

Нетрудно убедиться, что в этом случае $q_1 + p_{1_{\text{об}}} + p_1 = 1$.

**Ожидание в процессе собственно установления соединения**

Некоторые сети связи (АТС, автоматизированная диспетчерская связь, производственная громкоговорящая связь, централизованное автоматизированное громкоговорящее оповещение) имеют в своем составе коммутационные приборы и линии, которые используются коллективно, т. е. если число вызовов превысит количество указанных приборов и линий, то вновь поступающие вызовы будут ожидать освобождения одного, двух и т. д. (в зависимости от количества вновь поступающих вызовов) устройств от занятия предыдущей передачей информации. Аналогичное положение создается на радиосетях прямой диспетчерской связи, где коллективно используется радиоканал, а также в системе радиотелефонной автоматической связи, имеющей ограниченное количество радиоканалов для широкой группы абонентов.

При рассмотрении вопроса об ожидании во время установления соединения необходимо рассмотреть три частных случая:

1) число обслуживающих приборов больше одного, число источников нагрузки не ограничено;

2) число обслуживающих приборов больше одного, число источников нагрузки ограничено;

3) однолинейная система — один обслуживающий прибор.

Первый случай имеет место при телефонной и радиотелефонной автоматической связи; второй — при автоматизации диспетчерской телефонной связи, в избирательных системах производственной громкоговорящей связи и при централизованном автоматизированном громкоговорящем оповещении; третий — при прямой диспетчерской радиосвязи и в циркулярных системах производственной громкоговорящей связи.

Расчеты показывают, что при реальных значениях величины нагрузки и числе источников нагрузки более 40 система может рассматриваться в условиях неограниченного количества абонентов. В противном случае следует учитывать состояние не только вызывающего абонента, но и других источников нагрузки, под которыми понимаются телефонные аппараты, радиостанции и другие абонентские средства связи, каждым из которых пользуется группа абонентов.

Число источников нагрузки обозначим через $m$, а число обслуживающих приборов — через $v$. Потери времени на ожидание будут отсутствовать, если число одновременно поступающих вызовов не превосходит количества обслуживающих аппаратов, т. е. $\lambda(m) \leqslant v$. Таким образом, вероятность отсутствия потерь времени на ожидание равна вероятности застать для поступающего требования хотя бы один свободный прибор.

Следует отметить, что установление соединения с помощью коммутационных приборов всегда производится несколькими ступенями (ступени искания), на каждой из которых имеется определенное количество приборов. Занятость может возникнуть на любой ступени искания и для решения нашей задачи небезразлично, где она возникнет фактически. Отрезок времени от момента поступления вызова до момента, когда все ступени искания будут пройдены и установится соединение, будем называть моментом начала обслуживания по аналогии с подобной характеристикой в теории массового обслуживания.

Формулы для определения вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени на ожидание в процессе установления соединения (сверх времени $t_1$) получены в результате применения методов теории массового обслуживания с учетом того, что входящий поток требований — пуассоновский, а время обслуживания — показательное (см. табл. 2.2).

При выводе формул для определения вероятности отказа абонента от установления соединения принимается, что эти отказы возникают только тогда, когда время ожидания превысит какой-то заданный предел. Обозначим время ожидания (являющееся случайной величиной) через $\xi$, а указанный предел через $t$. Тогда во

всех случаях вероятность явных потерь может быть найдена как $p_{00}=P\{\xi>t\}$. Например, для первого случая $(m>40; v>1)$

$$P'_{2_{00}} \frac{y^v}{\sum_{k=0}^{v-1}\frac{y^k}{k!}+\frac{y^v}{(v-1)![v-y]}} \frac{1}{(v-1)![v-y]} e^{-\frac{1}{T_H}[v-y]t}.$$

Предел $t$ целиком определяется абонентом и, в частности, значением (важностью) той информации, которую он собирается передать. Поэтому $t$ является случайной величиной. На практике часто случается, что абонент сразу же после получения сигнала «занято» отказывается от осуществления передачи информации или подолгу пытается установить соединение. Влияющими факторами здесь являются работа сети связи (при большом среднем времени ожидания для сети в целом учащаются случаи быстрых отказов от установления соединения), загрузка абонентского устройства (при наличии ожидающих абонент может отказаться от установления соединения раньше), продолжительность технически необходимого на установление соединения времени $t_т$ и т. д. Вследствие этого величина $t$ должна устанавливаться конкретно для каждой сети на основании изучения соответствующих статистических данных.

Для всех рассматриваемых случаев вероятность того, что будут иметься затраты времени на ожидание в процессе установления соединения $p_2=1-q_2=p_{00}$. При малых величинах потерь сообщения допустимо считать, что вероятность потерь вызова по всему тракту соединения равна сумме вероятностей потерь на всех этапах соединения. Это положение справедливо, если потоки на отдельных ступенях однородны. В противном случае надо учитывать сдвиги максимумов потоков по времени. Если обозначить число ступеней искания через $n$, вероятность потерь вызова на одной ступени искания через $p$ (предполагается, что эти вероятности на всех ступенях равны) и вероятность потерь вызова в системе через $P$, то $Q=1-P=(1-p)^n\approx 1-np$; $P=np$, где $Q$ — вероятность того, что вызов не будет потерян ни на одной ступени искания. Остаток ряда $(1-p)^n$ при ограничении первыми двумя членами не будет превышать величины $\frac{n(n-1)}{2!}p^2$. Если потребовать, чтобы этот остаток не был больше $10^{-1}$, что обеспечило бы точность расчетов порядка 10%, то при минимально возможном $n=2$ (одна ступень группового и одна ступень линейного искания) величина $p$ должна быть не более 0,316 (31,6%). Практически такие высокие значения потерь вызова не встречаются и можно считать, что эти формулы пригодны для использования при разработке модели процесса доставки информации в сети производственной автоматической телефонной связи. Вследствие этого становится возможным многозвеньевую схему искания заменить однозвеньевой с чис-

лом обслуживающих приборов $v$, обеспечивающих заданную величину потерь сообщения.

Затраты времени на ожидание будут иметь место, если количество одновременно поступающих вызовов превосходит число обслуживающих приборов. Вероятность появления этих затрат времени определяется по известной формуле Эрланга (см. табл. 2.2):

$$p_2 = \frac{\frac{y_m^v}{v!}}{\sum_{k=0}^{v} \frac{y_m^k}{k!}} \qquad (3.49)$$

где $y_m$ — нагрузка, которая создается $m$ телефонными аппаратами и рассматривается как среднее число одновременно занятых линий — второе толкование нагрузки [24, 96].

Таким образом, поступивший вызов с вероятностью $p_2$ будет задержан и эта величина может рассматриваться как вероятность появления повторного вызова.

С точки зрения вывода формулы Эрланга потери, возникающие в результате занятости соединительных путей, являются явными (вызывающий абонент, получивший сигнал «занято», отказывается от дальнейших попыток установить соединение), а сама система коммутации — системой с потерями. В соответствии с рассматриваемой моделью получение абонентом сигнала «занято» еще не дает права отнести данный вызов к явным потерям, поскольку информация может быть передана при второй, третьей и т. д. попытках. Таким образом, рассматриваемая модель является частным случаем системы с ожиданием, где время ожидания зависит от числа попыток установить соединение, причем эти попытки осуществляются непрерывно друг за другом и, как указывалось выше, абонент не откажется от установления требуемого соединения. В более общем случае система с повторными вызовами занимает промежуточное место между системами с потерями (когда вызовы происходят с большими временными интервалами, позволяющими рассматривать их как новые вызовы) и системами с ожиданием (когда повторные вызовы следуют друг за другом непрерывно как в рассматриваемой модели) [75].

Вероятность осуществления $k$ безуспешных попыток установить требуемое соединение $p_{2k}$ равна произведению вероятностей следующих событий:

1) абонент получил сигнал «занято» при 1, 2, ..., $k$ попытках;

2) абонент установил требуемое соединение при $(k+1)$-й попытке.

Рассмотрим частный случай системы с повторными вызовами, когда вероятности $p_{21}$, $p_{22}$, ..., $p_{2k}$ не зависят от номера попытки и равны вероятности получения отказа $p_2$. Тогда математическое

ожидание числа попыток установить соединение $w_2$ можно получить из простых вероятностных соображений:

$$w_2 = \sum_{i=1}^{\infty} i(1-p_2)p_2^i = \frac{p_2}{1-p_2}. \qquad (3.50)$$

Время осуществления $(k+1)$-й успешной попытки установить соединение равно $t_т$, а каждой из предыдущих $k$ попыток — $\alpha t_т$, где $\alpha$ — коэффициент менее единицы, зависящий от того, на каких ступенях искания происходят отказы. Если, например, все отказы произошли на одной и той же $(n-r)$-й ступени искания, то $\alpha \approx (n-r)/n$, где $r=0, 1, 2, \ldots, (n-1)$ — индекс ступени искания, отсчет которых в данном случае ведется от $n$-й ступени. При таких предпосылках математическое ожидание непроизводительных затрат времени в процессе собственно установления соединения может быть оценено следующей формулой:

$$t_2 = w_2 \alpha t_т + t_т = t_т\left[1 + \alpha \frac{p_2}{1-p_2}\right]. \qquad (3.51)$$

С вероятностью $q_2=1-p_2$ непроизводительные затраты времени на установление соединения равны нулю, так как в этих случаях $y_m \leqslant v$.

### Ожидание освобождения телефонного аппарата вызываемого абонента

Вероятность того, что ожидания освобождения телефонного аппарата вызываемого абонента не будет, равна вероятности того, что данный телефонный аппарат свободен, т. е. $q_3=p_0$, где $p_0$ определяется по ф-ле (3.46).

Аналогично предыдущему принимаем, что вероятность наличия затрат времени $p_3=1-q_3$. С этой вероятностью вызывающий абонент будет повторять вызовы, механизм которых в достаточно общем виде рассмотрен в [74, 75, 76]. Если, как и выше, допустить, что вероятность отказа при повторной попытке установить соединение равна вероятности отказа при первом вызове, то общее число безуспешных и успешной попыток по аналогии с (3.50) будет равно

$$w_3 = \sum_{i=1}^{\infty} i(1-p_3)p_3^i = \frac{p_3}{1-p_3}. \qquad (3.52)$$

Так же, как и выше, принимаем, что абонент, получив отказ, становится в активную очередь, т. е. непрерывно пытается установить соединение. В этом случае затраты времени при установлении соединения с первой же попытки равны нулю, со второй попытки — $t_т$, с третьей — $2t_т$ и т. д. Однако поскольку реальная система имеет потери, необходимо учесть дополнительные затра-

ты времени $t_{23}$, связанные с возможностью появления отказов в процессе собственно установления соединения. Тогда математическое ожидание затрат времени на ожидание освобождения телефонного аппарата вызываемого абонента

$$t_3 = q_3 0 + q_3 p_3 t_т + q_3 p_3^2 2t_т + \ldots + q_3 p_3^r r t_т + t_{23}.$$

Учтя, что

$$\sum_{r=1}^{\infty} r p_3^{r-1} = \frac{1}{(1-p_3)^2}, \quad t_{23} = p_3 t_2,$$

после простейших преобразований окончательно получим

$$t_3 = q_3 t_т \frac{p_3}{(1-p_3)^2} + p_3 t_2. \tag{3.53}$$

**Подход к телефонному аппарату с учетом ориентирования входящего вызова**

Абонент не затрачивает времени на подход к телефонному аппарату при поступлении входящего вызова только в одном из двух случаев: 1) если он находится возле телефона, но в данный момент им не пользуется; 2) если он находится на пути к телефонному аппарату для осуществления предыдущего вызова. Первый случай имеет место, когда часть рабочего времени абонент проводит возле телефонного аппарата, не пользуясь им, т. е. когда одно из рабочих мест абонента совпадает с местоположением аппарата. Кроме того, входящий вызов может поступить в тот отрезок времени, когда абонент окончил предыдущий разговор, но еще не успел направиться к рабочему месту или хочет начать новый разговор. Наконец, входящий вызов может поступить во время пауз в процессе установления абонентом исходящего соединения. Второй случай относится к ситуации, когда абонент уже направляется к телефонному аппарату для осуществления предыдущего исходящего вызова и за этот отрезок поступает новый входящий вызов. По условию время подхода в этом случае относится к предыдущему вызову.

С учетом сказанного, вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату при поступлении входящего вызова

$$q_4 = \lambda_{вх}\left[\frac{t_{i=0}}{T} + \tau\lambda_{исх} T T_п + \tau_{исх}\lambda_{исх} T T_п\right] + \lambda_{исх} t_{4а} P_{вх}(1,\ t_{4а}), \tag{3.54}$$

где $t_{i=0}$ — время пребывания абонента на рабочем месте, совпадающем с местоположением телефона; $\tau$ — коэффициент, показывающий, в течение какой части времени разговора $T_п$ абонент находится возле телефона после окончания разговора; $\tau_{исх}$ — коэффициент, показывающий, какая доля времени приходится на различного рода паузы, в течение которых может поступить входящий

вызов; $t_{4a}$ — время перехода от рабочего места до телефонного аппарата для исходящего вызова, отнесенное к одному вызову: $t_{4a}=M[l]/\nu=t_{0a}$; $P_{вх}(1,\ t_{4a})$ — вероятность поступления одного входящего вызова за отрезок времени $t_{4a}$, когда абонент направляется к телефонному аппарату для осуществления исходящего вызова. В соответствии с принятым нами допущением о том, что входящий поток требований (вызовов) является пуассоновским, $P_{вх}(1,\ t_{4a})=\lambda_{вх}t_{4a}e^{-\lambda_{вх}t_{4a}}$.

Отношение $t_{i=0}/T$ представляет собой вероятность нахождения абонента возле телефонного аппарата по причинам, не связанным с пользованием им. Слагаемые $\tau\lambda TT_{и}$ и $\tau_{исх}\lambda_{исх}TT_{п}$ являются вероятностями осуществления технической возможности поступления входящего вызова в отрезки времени, когда телефонным аппаратом пользуются для других разговоров или соединений. Величина $\lambda_{исх}T$ есть математическое ожидание числа исходящих вызовов интенсивность пуассоновского потока. Она фигурирует в ф-ле (3.54) в связи с тем, что произведение $t_{4a}P_{вх}(1,\ t_{4a})$ является математическим ожиданием времени, отнесенного к одному вызову.

После подстановки и упрощений в ф-ле (3.54) получим

$$q_4=\lambda_{вх}\left[\frac{t_{i=0}}{T}-\tau\lambda TT_{и}+\tau_{исх}\lambda_{исх}TT_{п}\right]+\lambda_{исх}T\frac{M[l]}{\nu}\lambda_{вх}\frac{M[l]}{\nu}\times$$
$$\times e^{-\frac{\lambda_{вх}}{\nu}M[l]}-\lambda_{вх}T\left[\frac{t_{i=0}}{T^2}+\tau\lambda T_{и}+\tau_{исх}\lambda_{исх}T_{п}+\right.$$
$$\left.+\frac{\lambda_{исх}}{\nu^2T}[M[l]]^2e^{-\frac{\lambda_{вх}}{\nu}M[l]}\right]. \qquad (3.54')$$

Выше предполагалось, что телефонный аппарат снабжен идеальной сигнализацией, позволяющей требуемому абоненту незамедлительно начать подход к телефонному аппарату после поступления входящего вызова. На самом деле, как было отмечено в [24, 134, 137], возникают дополнительные затраты времени, связанные с ориентированием поступившего вызова, т. е. информированием вызываемого абонента о том, что вызов адресован именно ему. В идеальном случае, когда при каждом вызове требуемый абонент будет находиться возле телефонного аппарата, эти затраты будут равны нулю. В частности, дополнительные затраты равны нулю, если телефонным аппаратом пользуется только один абонент ($m=1$). Следовательно, данный вид дополнительных непроизводительных затрат времени возникает вследствие коллективного характера использования телефонного аппарата.

Введем некоторые обозначения: $T_{овз}$ — время подхода к телефонному аппарату с учетом ориентирования входящего вызова; $T_{опр}$ — время, затрачиваемое на опрос вызывающего абонента и сообщение о поступившем вызове вызываемому абоненту. Допустим, что телефонным аппаратом пользуются $m$ абонентов, каждый

из которых имеет математическое ожидание времени подхода $T_{вi}$ и интенсивность входящего потока вызовов $\lambda_{вхi}$. Рассмотрим величину затрат времени на ориентирование одного входящего вызова для $i$-го абонента. При этом могут иметь место следующие ситуации.

1. Вызов поступил в тот момент, когда у телефонного аппарата находился вызываемый абонент; вероятность этого события равна $q_{4i}$, а затраты времени данного вида — нулю.

2. С вероятностью $1 - q_{4i}$ вызов поступил в тот момент, когда $i$-й абонент не находился возле телефонного аппарата, но здесь присутствовал, по крайней мере, один из других $m-1$ абонентов. Вероятность такого сложного события равна $(1-q_{4i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{5j})\right]$, а затраты времени в этом случае составляют величину $T_{опр}+T_{вi}-\frac{1}{\lambda_i T}$.

3. С вероятностью $1-q_{4i}$ вызов поступил в тот момент, когда $i$-й абонент не находился возле телефонного аппарата. Если при этом возле телефонного аппарата не оказалось ни одного из $m-1$ других абонентов (вероятность такого события равна $\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})$, то на вызов может подойти сам $i$-й абонент с вероятностью $P_{овз\,i}$. Затраты времени в данном случае будут равны $T_{вi}-\frac{1}{\lambda_i T}$.

4. В предыдущей ситуации к телефонному аппарату подошел один из $m-1$ других абонентов. Затраты времени будут равны $T_{вi}-\frac{1}{\lambda_i T}+T_{опр}+\frac{T_{вi}}{\lambda_i T}$: вероятность такой величины затрат составляет $(1-q_{4i})\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})P_{овз\,j}$, где $P_{овз\,j}$ — вероятность того, что на поступивший вызов подойдет $j$-й абонент.

На основании изложенного математическое ожидание времени подхода при входящем вызове, отнесенное к одному вызову, будет равно

$$\frac{T_{овз\,i}}{\lambda_{вх}T}=0\cdot q_{4i}+\left[T_{опр}+\frac{T_{вi}}{\lambda_i T}\right](1-q_{4i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})\right]+$$

$$+\frac{T_{вi}}{\lambda_i T}\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})P_{овз\,i}+\left[\frac{T_{вi}}{\lambda_i T}+T_{опр}+\frac{T_{вj}}{\lambda_i T}\right]\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})P_{овз\,j}.$$

После несложных преобразований получим

$$\frac{T_{овз\,i}}{\lambda_{вх\,i}T}=\frac{T_{вi}}{\lambda_i T}\left\{(1-q_{4i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})\right]+2\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})P_{овзj}\right\}+$$

$$+T_{\text{опр}}\left\{(1-q_{4\,i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})\right]+\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})\,P_{\text{овз}\,j}\right\}+$$

$$+\frac{T_{\text{в}j}}{\lambda_j T}\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})\,P_{\text{овз}\,j}.$$

Отсюда окончательно математическое ожидание времени подхода при входящем вызове с учетом ориентирования вызова равно

$$T_{\text{овз}}=\sum_{i=1}^{n}T_{\text{овз}\,i},$$

где

$$T_{\text{овз}\,i}=\frac{\lambda_{\text{вх}\,i}}{\lambda_i}T_{\text{а}}\left\{(1-q_{4i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})\right]+2\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})P_{\text{овз}j}\right\}+$$

$$+\lambda_{\text{вх}\,i}TT_{\text{опр}}\left\{(1-q_{4i})\left[1-\prod_{j=1}^{m-1}(1-q_{4j})+\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})\,P_{\text{овз}\,j}\right]\right\}+$$

$$+\lambda_{\text{вх}\,i}T\frac{T_{oj}}{\lambda_j T}\prod_{j=1}^{m}(1-q_{4j})\,P_{\text{овз}\,j}. \qquad (3.55)$$

Предполагая, что все абоненты одинаковы с точки зрения величины создаваемого потока, вероятности нахождения возле телефона и времени подхода, получим

$$T_{\text{овз}}=m\left\{\frac{\lambda_{\text{вх}}}{\lambda}T_0\left[(1-q_4)+(1-q_4)^m\left(1-P_{\text{овз}}^m\right)\right]+\right.$$

$$\left.+\lambda_{\text{вх}}TT_{\text{опр}}\left[(1-q_4)-(1-q_4)^m\left(1-P_{\text{овз}}^m\right)\right]\right\}. \qquad (3.55')$$

Вероятности $P_{\text{овз}\,j}$ в ф-ле (3.55) зависят от расстояния $j$-го абонента от телефонного аппарата: чем ближе абонент к телефону, тем более вероятно, что подойдет на вызов именно он. Величина $T_{\text{опр}}$ в соответствии с [24] может быть принята равной порядка 9 с.

Рассмотренные выше формулы показывают, что непроизводительные затраты времени, связанные с подходом к телефонному аппарату, имеют величины, которые не позволяют их игнорировать при расчете сетей связи. Обнаруженные при этом закономерности оказываются достаточно сложными, но, тем не менее, допустимыми для вычислений не только на ЭВМ, но и вручную. Дальнейшее исследование данного вопроса позволит разработать методику определения числа абонентских устройств по критерию минимума затрат времени для осуществления подходов.

**Время, необходимое для выполнения технических операций по установлению соединения**

Во всех сетях связи для установления соединения с требуемым абонентом необходимо выполнить минимум технических операций, состав которых зависит от используемых средств и принятого способа коммутации (набор номера в АТС, нажатие ключа или кнопки в сетях диспетчерской и директорской связи и т. д.). На выполнение этих операций затрачивается время $t_т$, от величины которого, как было показано выше, в заметной степени зависит общая величина затрат времени, связанных с различного рода ожиданиями, а следовательно, и величина $T_п$, определяющая эффективность функционирования сети связи. Таким образом, разработка совершенных систем коммутации, при которых $t_т \to 0$, в заметной степени увеличивает эффективность связи.

Данные о промежутках времени, требуемых для установления соединения в различных сетях связи, приведены в табл. 3.8. Из таблицы видно, что не во всех случаях $t_т$ является постоянной величиной, так как в некоторых сетях связи (АТС, радиосвязь и особенно фототелеграф) скорость установления соединения зависит от сноровки абонентов, их подготовленности к пользованию средствами связи. Кроме того, имеют значение тип применяемой аппаратуры (АТС — координатные и декадно-шаговые; радиосвязь — с тональным вызовом без набора номера или с набором номера и т. д.) и схемы их использования (ПГС с центральными усилителями и др.). Поэтому в расчетах принимается средняя величина $t_т$ даже для одной конкретной сети связи.

## 3.5. ДОСТОВЕРНОСТЬ

Достоверность связи, характеризующая степень соответствия переданного сообщения принятому, количественно оценивается для различных способов передачи информации по-разному. Так, например, количественной оценкой достоверности передачи речевых сообщений (по сетям телефонной, радио- и производственной громкоговорящей связи) является артикуляция (разборчивость). В свою очередь, артикуляция при телефонной связи определяется величиной затухания тракта между абонентами, уровнем шумов и рядом других характеристик; при радиосвязи и производственной громкоговорящей связи — отношением уровня полезного сигнала к уровню помех и т. д. Поэтому ниже достоверность связи рассматривается отдельно для каждого способа передачи информации.

Общим подходом к определению достоверности связи для всех способов передачи информации является следующий. Некоторый уровень связи принимается за эталонный, т. е. такой уровень, при превышении которого реального увеличения артикуляции (для речевых сообщений) не происходит. При уровне ниже эталонного рез-

Таблица 3.8

ДАННЫЕ О ВЕЛИЧИНАХ ВРЕМЕНИ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ СОЕДИНЕНИЯ ($t_т$) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЕТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

| Наименование сети связи | Состав технических операций | Величина $t_т$, с |
|---|---|---|
| Автоматическая телефонная | 1. Ориентирование перед вызовом<br>2. Снятие микротелефонной трубки<br>3. Слушание сигнала ответа станции<br>4. Набор номера<br>5. Слушание сигнала контроля посылки вызова | Для АТС декадно-шаговой системы $t_т = 11 + 1{,}5n + t_{ор}$<br>Для АТС координатной системы[1]) $t_т = 15{,}5 + 1{,}5n + t_{ор}$<br>($n$—число знаков абонентского номера; $t_{ор}$ — время ориентирования перед вызовом. |
| Диспетчерская и директорская телефонная | 1. Вызов с коммутатора:<br>— нажатие ключа или кнопки,<br>— снятие абонентом микрофонной трубки<br>2. Вызов абонентом коммутатора:<br>— снятие микротелефонной трубки,<br>— нажатие ключа или кнопки на коммутаторе | 2,0 |
| Диспетчерская и директорская громкоговорящая | 1. Вызов с коммутатора: нажатие ключа или кнопки<br>2. Вызов абонентом коммутатора:<br>— нажатие кнопки на абонентском аппарате,<br>— нажатие кнопки на коммутаторе | 0,5<br>1,0 |
| Прямая диспетчерская радиосвязь | 1. Вызов абонентом центральной станции:<br>— снятие микротелефонной трубки,<br>— нажатие тангенты,<br>— вызов голосом,<br>— отжатие тангенты,<br>— манипуляции на центральной станции для выхода на связь | 12÷14 |

[1]) В координатных АТС после набора номера абонентом маркеры в течение 4,5 с (АТС К-100/2000) устанавливают требуемое соединение.

*Продолжение*

| Наименование сети связи | Состав технических операций | Величина $t_т$, с |
|---|---|---|
| | 2. Вызов с центральной станции абонента:<br>— снятие микротелефонной трубки,<br>— посылка сигнала тонального вызова,<br>— вызов голосом,<br>— снятие микротелефонной трубки абонентом,<br>— нажатие абонентом тангенты | 18÷24 |
| Производственная громкоговорящая с абонентскими усилителями | Вызов с абонентского пульта или пульта старшего:<br>— определение незанятости линии (акустически или оптически),<br>— выбор требуемой кнопки,<br>— нажатие кнопки | 0,5÷2,0 |
| Производственная громкоговорящая с центральными усилителями | Выбор требуемого направления передачи:<br>— включение усилителя,<br>— подключение микрофона, выбор фидера | 0,5÷3,0 |
| Абонентская телеграфная | Вызов требуемого абонента:<br>— ориентирование перед вызовом,<br>— нажатие кнопки вызова,<br>— ответ АТА,<br>— набор номера,<br>— включение мотора,<br>— обмен автоответами | $14 + 1,5n + t_{ор}$ |
| Фототелеграфная | Вызов требуемого абонента:<br>— ориентирование перед вызовом,<br>— набор номера с помощью телефонного аппарата, включенного в АТС декадно-шаговой системы,<br>— переговоры по включению фототелеграфных аппаратов на связь,<br>— включение фототелеграфных аппаратов | $12 + 1,5n + t_{ор} + t_{пф}$; $t_{пф}$ — время переговоров по включению фототелеграфных аппаратов |

ко уменьшается артикуляция (для речевых сообщений), что приводит к увеличению времени передачи информации, которое равно:

$$T_t = \frac{V_0}{c_0} z_k, \tag{3.56}$$

где $V_0$ — исходный объем передаваемых сообщений; $c_0$ — скорость передачи информации, соответствующая эталонному уровню достоверности; $z_k$ — увеличение продолжительности передачи информации при уровне достоверности ниже эталонного.

*Достоверность телефонной связи* определяется величиной затухания тракта между разговаривающими абонентами, уровнем окружающего шума, а также особенностями речи и слуха абонентов. Как указывалось выше, в этом случае достоверность оценивается с помощью понятия артикуляции (разборчивости) речи.

Существует два подхода к определению артикуляции — статистический и вероятностный. При статистическом подходе артикуляция понимается как отношение правильно воспринятых на приемном конце формант[1]) (звуков, слогов, слов, фраз) к общему числу переданных. При вероятностном подходе вводятся следующие обозначения: $A$ — вероятность правильного приема форманты; $D$ — вероятность правильного приема звука; $S$ — вероятность правильного приема слога; $W$ — вероятность правильного приема слова; $J$ — вероятность правильного приема фразы. Указанные вероятности и являются выражением артикуляции соответственно для формант, звуков, слогов, слов и фраз. Различные виды артикуляции связаны между собой соотношениями [117]:

$$S = 0{,}8J^3 + 0{,}2D^4; \tag{3.57}$$

$$W = \sum_{m=1}^{n} \frac{p_m}{1 + k_m\left(\frac{1}{D^m} - 1\right)}; \tag{3.58}$$

$$J = \frac{1}{1 + 0{,}1\left(\frac{1}{W^g} - 1\right)}, \tag{3.59}$$

где $m$ — число звуков в слове; $p_m$ — относительное число слов из $m$ звуков в словах русского языка ($p_m$=0,017÷0,142); $k_m$ — относительное число комбинаций, имеющих смысл слова, среди всех возможных комбинаций из $m$ звуков ($k_m$=0,084 при $m$=2; $k_m$=0,097 при $m$=3; $k_m$=0,024 при $m$=4; $k_m$=0,003 при $m$=5; $k_m$=0 при $m$>5); $g$ — среднее число слов в фразе (в русском языке $g$=5).

Зависимость слоговой разборчивости от разборчивости формант $S=f(A)$ представлена на рис. 3.12, а зависимости словесной

[1]) Форманты — элементарные составляющие звука — участки спектра частот, в которых сосредоточены наиболее интенсивные составляющие звука, имеющие значение для его распознавания. Звук составляет 1 или 2 форманты (см. [117]).

и фразовой разборчивости от разборчивости слогов — на рис. 3.13 и 3.14.

Учитывая, что все виды артикуляции (фразовая, словесная, слоговая, звуковая, формантная) связаны между собой, не имеет принципиального значения, каким из них пользоваться для оценки

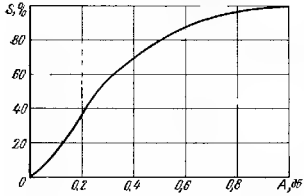



Рис. 3.12. Зависимость слоговой разборчивости от разборчивости формант

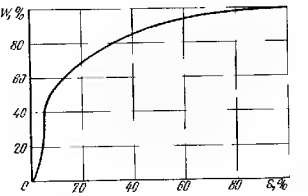



Рис. 3.13 Зависимость словесной разборчивости от разборчивости слогов

достоверности речи, так как всегда можно пересчитать полученное значение артикуляции при одном виде разборчивости на другой. Однако надо принять во внимание, что, как правило, только фразы содержат в себе законченную мысль, и поэтому именно они должны рассматриваться как «готовая продукция» систем производственной телефонной связи. Вследствие этого ниже для оценки достоверности указанных сетей связи принимается фразовая артикуляция (разборчивость).

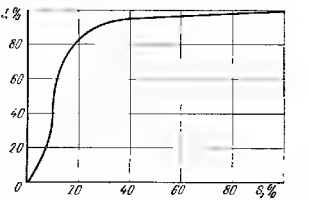



Рис. 3.14. Зависимость фразовой разборчивости от разборчивости слогов

Допустим, что по тракту передачи телефонной связи, имеющей фразовую артикуляцию $J$, должен быть передан объем сообщений $V_0$. Поскольку $J \neq 1$, не все фразы будут правильно приняты на одном конце, в результате чего возникнут переспросы и повторения передачи невоспринятых фраз. При этом опять какая-то часть фраз, определяемая величиной $J$, не будет понята абонентом и потребуется вновь передать часть информации и т. д. Таким образом, объем сообщений, фактически переданный по тракту телефонной связи, будет больше первоначального объема на величину, зависящую от фразовой разборчивости $J$. Попытаемся оценить данное увеличение объема передаваемых сообщений

Обозначим фактически переданный объем сообщений через $V_ф$. Очевидно, что

$$V_ф - V_0 = V_{пот},$$

где $V_{пот}$ — увеличение объема передаваемой информации за счет недостаточного качества тракта телефонной связи. Вероятность того, что объем сообщений $V_0$ будет передан без переспросов и повторений, равна величине фразовой разборчивости $J$. Однократно по тракту телефонной связи будет передан весь объем $V_0$, но правильно воспринята на приемном конце только часть этого объема $JV_0$. Пренебрегая временем переспроса, можно считать, что объем сообщений $V_0 - JV_0$ будет повторен. Вероятность такого события равна вероятности того, что при однократной передаче информации она не будет полностью правильно принята, т. е. $1-J$. При повторной передаче объема сообщений $V_0-JV_0$ правильно будет принят объем $J(V_0-JV_0)$. Следовательно, потребуется осуществить передачу в третий раз объема $V_0-JV_0-J(V_0-JV_0)=(1-J)^2V_0$, где $(1-J)^2$ — вероятность того, что часть объема сообщений будет передана трижды.

Таким образом, $V_ф=V_0+(1-J)V_0+(1-J)^2V_0+\ldots+(1-J)^{n-1}V_0$, где $n$ — максимальное число передач, которое необходимо осуществить, чтобы объем сообщений был полностью передан. Отсюда $V_{пот}=V_ф-V_0=(1-J)V_0+(1-J)^2V_0+\ldots+(1-J)^{n-1}V_0$. Учтя, что $(1-J)+(1-J)^2+\ldots+(1-J)^{n-1}$ является убывающей геометрической прогрессией со знаменателем $(1-J)$, получим

$$V_{пот} = V_ф - V_0 = V_0 \frac{(1-J)[1-(1-J)^n]}{1-(1-J)}.$$

Так как $(1-J)^{n-1}\to 0$, то

$$V_{пот} = V_0 \frac{1-J}{J}. \qquad (3.60)$$

Ухудшение достоверности связи сказывается не только на увеличение объема передаваемых сообщений, но и на уменьшение скорости передачи. Уменьшение скорости передачи в зависимости от изменения разборчивости для отдельных субъектов различно. Однако можно считать, что эта зависимость подчиняется психофизиологическому закону Вебера—Фехнера, который гласит: «прирост ощущения пропорционален логарифму отношения раздражений». В данном случае «раздражениями» являются изменения разборчивости речи, а «приростом ощущения» — изменение скорости речи. Таким образом,

$$c_t - c_0 = k \lg \frac{J}{J_0}, \qquad (3.61)$$

где $k$ — коэффициент пропорциональности; $J_0$ — фразовая разборчивость, соответствующая эталонной ($J_0=1$), т. е. $c_t-c_0=k\lg J$.

Коэффициент $k$ может быть определен, исходя из следующих соображений. Предельной величиной скорости передачи информации «снизу» является $c_i=0$. В этом случае передача информа-

ции из-за низкого качества тракта невозможна, хотя $J \gg 0$. Обозначим фразовую разборчивость, при которой передача становится невозможной, через $J_k$. Тогда $-c_0 = k \lg J_k$ и $k = -\dfrac{c_0}{\lg J_k}$.

Как показано в [117], если фразовая артикуляция будет меньше $J_k = 0{,}9$, то абоненты не смогут установить контакта между собой, и разговор не состоится. Фразовая артикуляция $J_k = 0{,}9$ соответствует слоговой разборчивости $S_k \approx 0{,}25$ и словесной разборчивости $W_k \approx 0{,}75$, разборчивости звуков $D_k \approx 0{,}64$, разборчивости формант $A_k \approx 0{,}12$. Таким образом, принимая $J_k = 0{,}9$, получим

$$k = 21{,}83 \tag{3.62}$$

и $c_i - c_0 = 21{,}83\, c_0 \lg J$. Отсюда

$$c_i = c_0 (1 + 21{,}83 \lg J). \tag{3.63}$$

Следует отметить, что при $J \to 0{,}9$ $V_{\text{пот}} = 1{,}11$. Следовательно, при любой практически осуществленной передаче фактический объем ее может превышать исходный объем сообщений не более, чем на 11%. Изменение скорости речи оказывает на общее время передачи значительно большее влияние, чем увеличение передаваемого объема. Так, при $J \to 0{,}9$ $c_i \to 0$ и $T_i \to \infty$. Выражение для времени передачи с учетом полученных соотношений может быть представлено в виде

$$T_i = \frac{V_i}{c_i} = \frac{V_0 \left(1 + \dfrac{1 - J}{J}\right)}{c_0 (1 + 21{,}83 \lg J)} \approx \frac{V_0}{c_0} \cdot \frac{1}{J (1 + 21{,}83 \lg J)}. \tag{3.64}$$

Тогда

$$z_k = \frac{1}{J (1 + 21{,}83 \lg J)}. \tag{3.65}$$

График $z_k = f(J)$ дан на рис. 3.15.

Таким образом, полученные формулы полностью выражают потери времени, связанные с недостаточным качеством тракта, определяемым артикуляцией (разборчивостью) речи. Однако в большинстве случаев необходимо иметь возможность оценить достоверность связи и соответствующие ему потери времени в зависимости не от $J$, а непосредственно от характеристик тракта: затухания, уровня шума, уровня речи. Указанная оценка осуществляется в соответствии с методикой, изложенной, например, в [117].

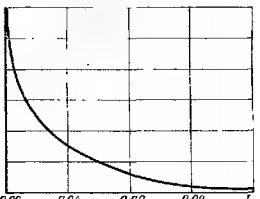


Рис. 3.15. График функции $z_k = f(J)$

Весь диапазон частот речи разбивается на 20 равноартикуля-

ционных полос, т. е. полос, каждая из которых вносит равную 5-процентную долю в общую разборчивость формант или, другими словами, полос, вероятности появления формант в которых равны между собой [48]. Отсюда формантная разборчивость $A = 0{,}05 \sum_{k=1}^{20} p_k$, где $p_k$ — коэффициент восприятия в $k$-й равноартикуляционной полосе, равный отношению числа формант, которые в реальных условиях передачи дойдут до уха слушающего с уровнем выше порогового, к общему числу формант в данной полосе.

Коэффициент восприятия $p_k$ является функцией эффективного уровня ощущения формант в полосе $E'$, определяемого как

$$E' = A_p + k - (a + M) - \alpha_0,$$

где $A_p$ — спектральный уровень формант, действующий в данной полосе на микрофон говорящего абонента; $k$ — логарифмическая ширина критической полосы слуха; $a = 20 \lg \frac{P_1}{P_2}$ — затухание всего тракта от микрофона говорящего до уха слушающего ($P_1$ - звуковое давление в микрофоне; $P_2$ — звуковое давление в ухе слушающего); $M$ — результирующая маскировка от шумов всех видов; $\alpha_0$ уровень порога слышимости на средней частоте рассматриваемой полосы.

При эффективном уровне ощущения шума свыше 10 дБ уровень ощущения формант перестает зависеть от слуховых данных слушающих и равен $E' = A_p - a - A_ш$, где $A_ш$ — спектральный уровень шума.

Зависимость коэффициента восприятия от эффективного уровня ощущения формант при различных уровнях шума $A_ш$ представлена на рис. 3.16. Первая кривая ($A_ш = 40$ дБ) соответствует нормальному шуму в закрытом помещении (комнате). Зная величину $E'$, по кривой 3.16 можно определить коэффициент восприятия $p_k$ в каждой полосе, а затем по вышеприведенной формуле — формантную разборчивость. Переход от формантной разборчивости к слоговой, а затем фразовой производится по кривым рис. 3.12 и 3.14.

Рассчитанная по указанной методике зависимость $J = f(a)$ при уровнях шумов 40 и 70 дБ представлена на рис. 3.17. Расчет производился при условии, что в качестве телефонных аппаратов абонентов используется аппарат типа ТАН-5; затухание, вносимое питающими мостиками, равно затуханию, вносимому схемой АТС; частотные зависимости шумов усреднены.

Из рис. 3.17 следует, что при уровне шума 40 дБ заметное ухудшение разборчивости начинается с затухания, равного примерно 40 дБ. Однако даже при затухании 56 дБ фразовая артикуляция составляет величину порядка 90%. Это согласуется с реальными фактами, когда даже при очень плохой слышимости разборчивость остается удовлетворительной (например, когда при испорченном

микрофоне один абонент говорит в телефон). При уровне шума 70 дБ резкое ухудшение разборчивости начинается при затухании тракта порядка 13÷20 дБ.

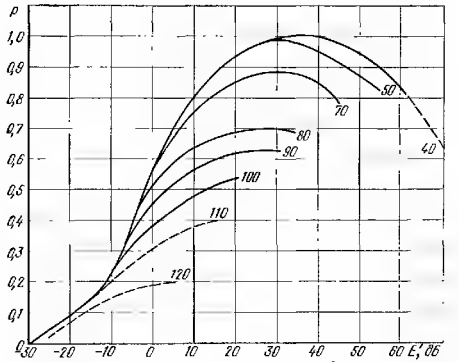



Рис. 3.16. Зависимость коэффициента восприятия от эффективного уровня ощущения формант при разных уровнях шума

На рис. 3.18 представлена зависимость $z_k = f(a, A_ш)$.

Найдем вероятности, характеризующие возможность появления или отсутствия непроизводительных затрат времени в процессе до-

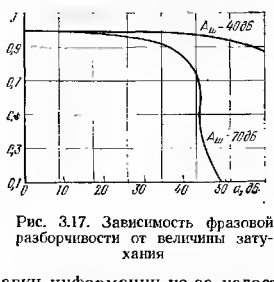



Рис. 3.17. Зависимость фразовой разборчивости от величины затухания

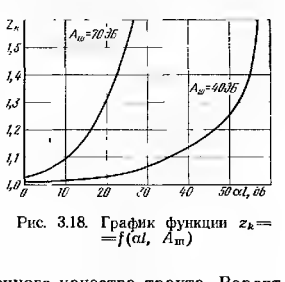



Рис. 3.18. График функции $z_k = f(\alpha l, A_ш)$

ставки информации из-за недостаточного качества тракта. Вероятность $q_5$ того, что потерь времени из-за недостаточного качества тракта не будет, равна произведению вероятностей двух событий: а) затухание данного тракта таково, что фразовая разборчивость с

заданной степенью точности равна 1; б) уровень окружающего шума на обоих концах обеспечивает с заданной степенью точности фразовую разборчивость, равную 1.

Если принять за меру точности $\varepsilon = 0{,}001$, то заданным условиям удовлетворяют затухание тракта $a \leqslant 13$ дБ и уровень шума $A_{\text{ш}} \leqslant 40$ дБ. При уровне шума более 40 дБ или затухании тракта более 13 дБ либо при одновременном увеличении и уровня шума и затухания будут иметься потери времени из-за недостаточного качества. Искомая вероятность их равна

$$q_{\text{б}} = \frac{N_{13}}{N_{\text{общ}}}(1 - t_{40})^2, \tag{3.66}$$

где $N_{13}$ — количество абонентов, при связи с которыми данного абонента затухание меньше (или равно) 13 дБ; $N_{\text{общ}}$ — общее количество абонентов сети; $t_{40}$ — время, в течение которого соблюдается условие $A_{\text{ш}} \geqslant 40$ дБ (в долях часа). Величина $N_{13}$ может быть определена для каждой сети, исходя из ее геометрических размеров, типов применяемых кабелей и аппаратуры, а $t_{40}$ — путем измерений на соответствующих объектах.

Средние потери времени из-за недостаточного качества тракта будут равны

$$t_{\text{б}} = \left[\frac{1}{J_{\text{ср}}(1 + 21{,}83 \lg J_{\text{ср}})} - 1\right]\frac{V_{\text{в}}}{c_0}, \tag{3.67}$$

где $J_{\text{ср}}$ — средняя величина фразовой артикуляции, определяемая для каждой конкретной сети.

Рассмотрим вопрос о скорости разговорной речи $c_0$, соответствующей эталонному уровню достоверности. Естественно, что можно говорить только о средней величине этой скорости, так как для разных индивидуумов (да и для одних и тех же индивидуумов в разные отрезки времени) она различна. Установлено (см. [117] и др.), что длительность пауз в непрерывной речи составляет в среднем 16% от суммарного времени разговора. Известно также, что слияние двух сигналов в один начинается при уменьшении сдвига во времени между ними на величину, меньшую 100 мс. Тогда можно записать:

$$c_0 = \frac{(1000 - 160) - 100(c_0 - 1)}{a_{\text{ср}}}; \quad c_0 = \frac{940}{a_{\text{ср}} + 100}.$$

Здесь $c_0$ — средняя скорость разговорной речи, зв/с; $a_{\text{ср}}$ — средняя продолжительность произношения одного звука, мс/зв:

$$a_{\text{ср}} = p_{\text{гл}} t_{\text{гл}} + p_{\text{согл}} t_{\text{согл}},$$

где $p_{\text{гл}}$ и $p_{\text{согл}}$ — вероятность появления соответственно гласного и согласного звуков в русском языке, в [168, 183] приводятся данные, с помощью которых можно установить, что $p_{\text{гл}} = 0{,}423$; $p_{\text{согл}} = 0{,}577$; $t_{\text{гл}}$ и $t_{\text{согл}}$ — средняя продолжительность произношения гласного и согласного звуков; эти продолжительности определяются с учетом временных характеристик звуков речи и вероятностных соотноше-

ний в русской речи. После соответствующих расчетов получено: $t_{гл} \approx 179$ мс; $t_{согл} \approx 85$ мс. Отсюда $a_{ср} = 0{,}423 \cdot 179 + 0{,}577 \cdot 85 = 76 + 49 - 125$ мс. Поэтому

$$c_0 \approx \frac{940}{125 + 100} \approx 4{,}18 \text{ зв.} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Полученная величина скорости разговорной речи в единицах информации равна 6,15 десят. ед. $\cdot$ с$^{-1}$, или 20,5 бит $\cdot$ с$^{-1}$.

Необходимо отметить, что при уровне шума свыше 72÷75 дБ, воздействующего на говорящего, последний осуществляет форсирование речи (повышение громкости), в результате чего увеличивается разборчивость. Однако при уровне шума 100 дБ напряжение голосовых связок достигает предела и дальнейшего повышения громкости речи не происходит. Усредненная зависимость приращения суммарной интенсивности спектра речи $\Delta A_р$ в зависимости от суммарного уровня окружающего шума гладкого и низкочастотного спектров приведена на рис. 3.19. Из рис. 3.19 следует, что максимальное увеличение интенсивности речи по отношению к уровню речи в тишине достигает 14 дБ.

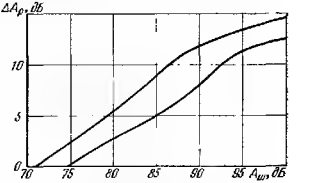


Рис. 3.19 Зависимость приращения суммарной интенсивности речи $\Delta A_р$ от суммарного уровня окружающего шума $A_ш$

Разборчивость речи при радиотелефонной связи определяется уровнем речи на передающем конце ($A'_р$), акустическими характеристиками средств приема и передачи речи, усилением радиотракта ($S_k$) и уровнем шумов ($A_ш$).

Эффективный уровень ощущения формант (см. [117]):

$$E' = A_р + S_{мт} + S_k - A_ш; \; S_{мт} = 20 \lg A_м A_т \cdot 10^3,$$

где $A_м$, $A_т$ — отдача соответственно микрофона (на передающем конце) и телефона (на приемном конце); $S_k = 20 \lg (U_1/U_2)$; $U_1$ — напряжение на входе модулятора передатчика радиостанции; $U_2$ — напряжение, развиваемое при этом на телефоне.

Поскольку во многих случаях радиосвязь осуществляется в условиях высокого уровня шумов (больше 70 дБ), следует учитывать влияние форсирования речи. Поправки на изменение формантного спектра форсированной речи ($\Delta A'_р$) в зависимости от частоты и степени форсирования приведены на рис. 3.20. С учетом форсирования речи при увеличении уровня шума $E_f = E' + \Delta A'$. Вероятность отсутствия потерь времени при осуществлении радиоразговора может быть подсчитана по формуле:

$$q_б = \frac{T - t_{A_{ш_0}}}{T},$$

где $t_{A\ ш_0}$ — время, в течение которого при данных условиях передачи уровень шума превышает величину, соответствующую фразовой разборчивости (с заданной степенью точности), равной 1; $T$ — общий баланс времени.

*Достоверность телеграфной связи и сети передачи данных.* Качество передачи данных [111] определяется коэффициентом ошиб-

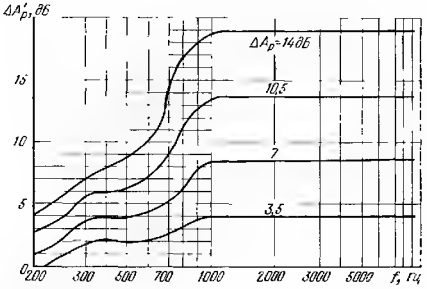



Рис. 3.20. Поправка на изменение формантного спектра форсированной речи $\Delta A'_р$ в зависимости от частоты $f$ и степени форсирования $\Delta A_р$

бок — средним значением отношения количества неправильно принятых знаков к общему количеству переданных. Указанная характеристика является основным качественным показателем системы передачи документированной информации. Поскольку телеграфная связь используется для передач как текстовых, так и цифровых материалов, требования, предъявляемые к ней, изменяются в зависимости от формы передаваемой информации. Если при передаче текста имеется возможность восстановить ошибочно принятые места по смыслу (вследствие присущей письменной речи избыточности), то при передаче цифровой информации (в случае отсутствия специальных устройств обнаружения и исправления ошибок) такой возможности нет.

Следует отметить, что в настоящее время на промышленных предприятиях и в строительных организациях страны широко применяется абонентский телеграф (АТ). Поэтому ниже рассмотрим качество телеграфной связи с точки зрения его влияния на эффективность функционирования систем передачи как текстовых, так и цифровых материалов только для указанной разновидности телеграфной связи.

Увеличение объема передаваемых сообщений за счет недостаточного качества тракта телеграфной связи можно подсчитывать по формуле

$$V_{\text{пот}} = V_0 \frac{k}{1-k}. \tag{3.68}$$

где $k$ — коэффициент ошибок. Так как скорость телеграфирования является величиной постоянной, то увеличения или уменьшения времени передачи из-за недостаточного качества тракта здесь не происходит.

Время передачи информации

$$T_{u_i} = \frac{V_i}{c_0} = \frac{V_0}{c_0}\left(1 + \frac{k}{1-k}\right) \tag{3.69}$$

и увеличение продолжительности передачи

$$z_k = 1 + \frac{k}{1-k}. \tag{3.70}$$

Вероятность отсутствия затрат времени из-за недостаточного качества тракта равна вероятности события, заключающегося в том, что $k=0$. Таким образом,

$$q_5 = \frac{n_{k=0}}{N}, \tag{3.71}$$

где $n_{k=0}$ — количество связей, при которых ошибок зафиксировано не было; $N$ — общее количество связей.

Если рассматриваются несколько направлений связи, то вероятности $q_5$ должны подсчитываться для каждого из них. Средняя величина затрат времени

$$t_5 = \frac{V_{\text{пот}}}{c_0} = \frac{V_0}{c_0} \frac{k_{\text{ср}}}{1-k_{\text{ср}}}. \tag{3.72}$$

Величина $k_{\text{ср}}$ определяется либо для всех связей в целом, либо для связей по каждому направлению. При передаче цифровой информации в сообщение вносится определенная избыточность, позволяющая на приемном конце выявить ошибки.

Таким образом, объем передаваемых цифровых сообщений может быть выражен формулой

$$V_{\text{пер}} = V_0 + V_{\text{код}} + V_{\text{пвт}}, \tag{3.73}$$

где $V_0$ — исходный объем сообщений (передаваемых на вход ВЦ или с выхода ЭВМ); $V_{\text{код}}$ — объем вносимой избыточности для возможности определения ошибок на приемном конце; $V_{\text{пвт}}$ — объем повторно передаваемой информации при обнаружении ошибки на приемном конце.

Объем вносимой избыточности $V_{\text{код}}$ целиком определяется исходным объемом сообщений $V_0$ и способом кодирования, а именно: 1) при двойной передаче $V_{\text{код}} \approx 2V_0$; 2) при контрольном сум-

мировании по горизонтали — $V_{\text{код}}=\frac{2}{\alpha_c}V_0$, где $\alpha_c$ — среднее число знаков в одной строке; 3) при контрольном суммировании по вертикали — $V_{\text{код}}=\frac{2\alpha_c}{v_r}V_0$, где $v_r$ — средний объем сообщений в каждой из групп, на которые разбивается исходный объем сообщений для осуществления контрольного суммирования по вертикали; 4) при контрольном суммировании и по вертикали и по горизонтали (при соответствующей разбивке исходного сообщения на отдельные группы) — $V_{\text{код}}=\frac{2}{\alpha_c}V_0+\frac{2\alpha_c}{v_r}V_0=\frac{2}{\alpha_c}V_0\left(1+\frac{\alpha_c}{v_r}\right)$.

В общем виде

$$V_{\text{код}}=\beta V_0, \tag{3.74}$$

где $\beta=2$ для двойной передачи; $\beta=2/\alpha_c$ — для суммирования по горизонтали; $\beta=2\alpha_c/v_r$ — для суммирования по вертикали; $\beta=\frac{2}{\alpha}\left(1+\frac{\alpha}{v_r}\right)$ — для суммирования по горизонтали и вертикали.

Применение указанных методов кодирования с помощью внесения в текст искусственной избыточности позволяет только обнаружить ошибку. Устройства, которые не только обнаруживают, но и исправляют ошибки, на сети абонентского телеграфа в настоящее время не применяются. Ошибки исправляют вручную путем запроса с приемного конца повторения передачи неверно принятых строк. При этом могут быть рассмотрены два случая:

1) запрос на повторение передачи производится сразу же после окончания основной передачи;

2) запрос на повторение передачи посылается после отбоя при установлении нового соединения.

Первый случай имеет место при использовании в качестве устройств, сверяющих передаваемую информацию (например, по контрольным суммам) цифровых электронно-вычислительных машин, работающих по специальной программе. Второй случай соответствует ручному способу (с применением различных арифметических машин, но не ЭВМ) дешифровки принятого текста.

Объем повторно передаваемых сообщений в обоих случаях будет одинаков, так как он целиком определяется лишь качеством тракта передачи. Однако время, необходимое для передачи, будет различным, поскольку во втором случае должно быть учтено дополнительное время на установление повторного соединения.

Количество строк, которые потребуется передать повторно, можно принять равным количеству допущенных ошибок, если допустить, что вероятность появления двух и более ошибок в одной строке пренебрежимо мала. Указанное допущение можно сделать, исходя из того, что вероятность появления одной ошибки мала, а вероятность появления двух ошибок в одной строке является функцией квадрата этой величины. Тогда число повторно передаваемых строк $z_2=kV_0$. Учитывая, что в одной строке $\alpha_c$ знаков, получим

$V_2=k\alpha_c V_0$. В третий раз потребуется осуществить передачу $z_3=k^2\alpha_c V_0=V_3$ знаков. Таким образом,

$$V_{\text{пвт}}=V_2+V_3+\cdots=k\alpha_c V_0+k^2\alpha_c V_0+\cdots,$$

т. е. имеем бесконечно убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем $k$. Следовательно,

$$V_{\text{пвт}}=\frac{kV_0}{1-k}-V_{\text{пот}}. \tag{3.75}$$

Таким образом, ф-ла (3.73) может быть записана в виде

$$V_{\text{пер}}=V_0\left(1+\beta+\frac{k}{1-k}\right). \tag{3.76}$$

Из ф-лы (3.76) следует, что увеличение объема передаваемого сообщения за счет внесения искусственной избыточности при недостаточном качестве тракта $V_{\text{пот}}$ будет равно:

$$V_{\text{пот}}=V_{\text{пер}}-V_0=V_0\left(1+\beta+\frac{k\alpha_c}{1-k\alpha_c}\right)-V_0=V_0\left(\beta+\frac{k\alpha_c}{1-k\alpha_c}\right).$$

Отсюда

$$T_{\text{ви}}=\frac{V_{\text{пот}}}{c_0}=\frac{V_0}{c_0}\left(\beta+\frac{k\alpha_c}{1-k\alpha_c}\right)$$

и

$$z_k=\beta+\frac{k\alpha_c}{1-k\alpha_c}.$$

При этом для ручного способа дешифровки должно быть дополнительно учтено время на установление соединения. Средние затраты указанного времени

$$t_5=\frac{V_{\text{пот}}}{c_0}=\frac{V_0}{c_0}\left(\beta+\frac{k_{\text{ср}}\alpha}{1-k_{\text{ср}}}\right). \tag{3.77}$$

Данные затраты времени относятся к абоненту сети абонентского телеграфа, где понятия «абонент» и «оператор» по существу совпадают. Для сетей прямой телеграфной связи эти затраты делятся между абонентом и оператором, так как обычно дешифровка выполняется абонентом, а передача информации — оператором. Тогда первое слагаемое в выражении для $z_k$ характеризуют непроизводительные затраты времени абоиента, а второе слагаемое — оператора.

## 3.6. НАДЕЖНОСТЬ

При установлении каждого соединения и в процессе каждого разговора (передачи информации) задействуется определенное количество различных приборов и элементов, любой из которых имеет ограниченную величину надежности. Поэтому имеется вероятность того, что за указанный период времени ($T_{\text{и}}+T_{\text{п}}$) может отказать какой-либо элемент (прибор) и передача информации прекратится. В резервированных системах такой отказ приводит к

увеличению величины $T_п$, так как абоненты возобновляют соединение, пользуясь резервными каналами связи (например, на АТС). В нерезервированных системах отказ приводит к срыву передачи информации ($T_п \to \infty$), поскольку соединение абонентов не может быть восстановлено до устранения повреждения, время которого всегда значительно больше величины $t$ — предела, при достижении которого абонент отказывается от попытки восстановить соединение. Срыв доставки информации может произойти также и при вручении ее не по адресу или при неправильном адресе. Для учета этих и некоторых других факторов, определяющих надежность функционирования сети доставки информации, необходимо иметь соответствующие количественные оценки отказов, возникающих в данной сети. В настоящее время такие оценки отсутствуют. Нет и методики определения надежности всей сети доставки информации в целом. Поэтому ниже рассматривается надежность только тракта передачи информации, которая уже достаточно изучена

В самом распространенном случае тракт передачи информации может рассматриваться как совокупность последовательно соединенных элементов. На рис. 3.21 представлены схематично указан-

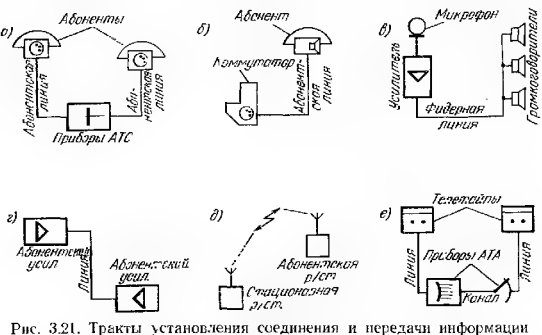



Рис. 3.21. Тракты установления соединения и передачи информации для различных сетей производственной связи:
*а*) сеть ПАТС; *б*) сеть диспетчерской и директорской связи; *в*) сеть производственной громкоговорящей связи с центральным усилителем; *г*) сеть производственной громкоговорящей связи с абонентскими усилителями; *д*) сеть радиосвязи; *е*) сеть абонентского телеграфа

ные тракты для различных сетей связи. Принимается, что источники электропитания также включены последовательно. Например, при связи радиостанции типа 12Р1, имеющей интенсивность отказов $\lambda_1 = 0{,}00214$ 1/ч, с радиостанцией типа 33Р1, имеющей интенсивность отказов $\lambda_2 = 0{,}00175$ 1/ч, суммарная интенсивность отказов будет равна: $\lambda_п = \lambda_1 + \lambda_2 = 0{,}00214 + 0{,}00175 = 0{,}00389$ 1/ч.

Таблица 3.9

ДАННЫЕ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ НЕКОТОРЫХ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

| Наименование оборудования | Интенсивность отказов $1/ч \cdot 10^{-6}$ | Наименование оборудования | Интенсивность отказов $1/ч \cdot 10^{-6}$ |
|---|---|---|---|
| Телефонный аппарат АТС | 3,7 | Пульт системы «Желудь» (ПГТС 5/10) | 604 |
| Микрофоны | 7,7 | Радиотрансляционный усилитель ТУ-100М | 650 |
| Громкоговорители | 11,5 | Радиостанция «Гранит» | 1000 |
| Пульт радиотрансляционного узла ТУ-600 | 21,5 | Фототелеграфный аппарат «Ладога» | 1640 |
| Коммутатор КОС-22М | 60 | Пульт системы «Желудь» (ПГТС 20/10) | 1670 |
| Выходной щиток радиотрансляционного узла ТУ-600 | 76 | Радиостанции 33Р1, 28Р3 | 1750 |
| Выпрямитель системы «Березка» | 151 | Радиостанции 42Р1, 43Р3 | 2140 |
| Выносной пульт системы «Желудь» (ВПГС-5) | 232 | Радиостанции 04Р1, 24Р1 | 2670 |
| Коммутатор К-1 системы громкоговорящей связи «Березка» | 253 | Радиостанция «Алтай-АС» | 2500 |
| Коммутатор ДКЗ-40 | 268 | Радиостанция ЖР-3М | 2740 |
| Абонентский пульт системы «Желудь» (АГТС-1) | 283 | Радиостанция 30Р3 | 2825 |
| Коммутатор К-3 системы громкоговорящей связи «Березка» | 350 | Радиостанция ЖР-5М | 3500 |
| Радиотрансляционный усилитель ТУ-50М | 390 | Система производственной громкоговорящей связи ПГСИ-10 | 3600 |
| Радиотрансляционный усилитель УМ-50А | 405 | Промышленная телевизионная установка ПТУ-22 | 5880 |
| Коммутатор К-5 системы громкоговорящей связи «Березка» | 430 | Телеграфный аппарат СТА-2М | 6760 |
| Радиотрансляционный узел ТУ-600 | 437 | Радиостанция 08Р1 | 7250 |
| Станция диспетчерской связи СДС М-50-100 | 526 | Промышленная телевизионная установка ПТУ-23 | 7700 |
| Коммутатор К-10 системы громкоговорящей связи «Березка» | 600 | Промышленная телевизионная установка ПТУ-24 | 8700 |
| | | Система производственной громкоговорящей связи ПГСИ-30 | 8850 |
| | | Промышленные телевизионные установки: | |
| | | ПТУ-101 | 12 200 |
| | | ПТУ-102 | 13 625 |
| | | ПТУ-103 | 15 150 |

Данные об интенсивностях отказов некоторых средств производственной связи, заимствованные из [7], приведены в табл. 3.9.

Вероятность безотказной работы технических средств, образующих тракт установления соединения и передачи информации, может быть определена по формуле

$$q_6 = e^{-\lambda_и T}, \tag{3.78}$$

где $T$ — рассматриваемый отрезок времени: $T = T_и + T_п$.
Тогда

$$q_6 - e^{-\lambda_и (T_и + T_п)}. \tag{3.79}$$

Для нерезервированных систем вероятность наличия отказа, как указывалось выше, равна вероятности срыва передачи информации, т. е.

$$p_{006} = 1 - e^{-\lambda_и (T_и + T_п)} \tag{3.80}$$

и $t_6 \to \infty$, где $t_6$ — среднее время ожидания из-за недостаточной надежности элементов в нерезервированных системах.

В резервированных системах вероятность возникновения отказа

$$p_6 = 1 - e^{-\lambda_и (T_и + T_п)}. \tag{3.81}$$

С этой вероятностью в системе будут иметь место дополнительные затраты времени из-за ограниченной надежности элементов. С достаточной для практических расчетов точностью можно принять, что $t_6 \approx T_п$. Как указывалось выше, эти затраты времени относятся только к тракту передачи информации, состоящему из определенных технических устройств, но не могут характеризовать сеть доставки информации в целом.

# ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

## *Эффективность функционирования сетей производственной связи*

### 4.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ СЕТЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

В гл. 3 были рассмотрены общие стороны механизма функционирования сетей производственной связи. Введенные критерии эффективности функционирования (математическое ожидание величины $\frac{T_и}{T_и + T_п}$, оперативность, надежность структуры) являются возможными, но не единственными показателями, характеризующими степень приспособленности указанных сетей к заданным условиям их использования. Иначе говоря, передача информации в некритических по срокам ее доставки адресатам ситуациях может оцениваться не только величиной $E$, определяемой выражением (3.12), но и другими показателями, учитывающими специфические условия функционирования рассматриваемых сетей. Аналогично в ситуациях, когда жестко ограничено время доставки информации, одного показателя оперативности связи может оказаться недостаточно для характеристики работоспособности сети. Однако в очень большом количестве случаев введенные в предыдущей главе критерии эффективности функционирования оказываются удобными не только для оценки пригодности работы сетей связи в заданных условиях, но и для непосредственного решения определенного класса задач.

Прежде всего необходимо научиться рассчитывать критерии эффективности функционирования различных сетей производственной связи. Каждая из этих сетей имеет существенные особенности, которые находят свое отражение и в расчетах. Доставка информации в сетях производственной автоматической телефонной связи, как правило, некритична ко времени и может оцениваться показателем $E$. Наоборот, в сетях прямой связи предъявляются жесткие требования к срокам доставки информации адресатам, вследствие чего процессы доставки должны характеризоваться оперативностью связи.

Расчет показателей, характеризующих эффективность функционирования каждой сети производственной связи, осуществляется на основе математической модели процесса доставки информации. Общие математические модели этого процесса рассматривались в разд. 3.3. В данной главе описываются математические модели и методика определения эффективности функционирования различных сетей производственной связи с приведением соответствующих результатов расчетов. При этом используются одни и те же 9 элементов модели, достаточно подробно описанные в гл. 3.

В качестве основного допущения примем, что абонент ни в коем случае не откажется от попытки установить соединение. Тогда элементы модели $t_{\text{т}}$ и $T_{\text{п}}$ присутствуют в любом состоянии сети и общее число состояний в соответствии с приведенной в разд. 3.3 формулой равно $z=2^{n'}=2^7=128$. Это число состояний является максимальным для рассматриваемой модели и позволяет достаточно удовлетворительно отобразить такой весьма сложный процесс доставки информации, который происходит в сети производственной автоматической телефонной связи. Модели остальных сетей производственной связи могут быть получены с использованием еще меньшего числа элементов. Последнее означает, что в этих сетях некоторые элементы модели имеют вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени $q_i=1$ и соответственно $t_i=0$.

Непроизводительные затраты времени в различных элементах модели процесса доставки информации в сетях производственной связи определяются организацией процесса в той или иной сети. Например, сеть производственной громкоговорящей связи специально создана для того, чтобы абонент мог воспринимать информацию, находясь на своем рабочем месте. Однако при неудачном размещении громкоговорителей может возникнуть такое положение, когда требуемый абонент вызывается по телефону в другое помещение, где он прослушивает адресованное ему сообщение по сети производственной громкоговорящей связи. В сети автоматизированной диспетчерской телефонной связи появляются затраты времени на ожидания в процессе собственно установления соединения ($t_2>0$), которые отсутствуют в сетях ручной диспетчерской связи. Это происходит вследствие того, что при автоматизации диспетчерской телефонной связи абонент может осуществлять связь не с одним диспетчером, а с целым кругом абонентов, вследствие чего возникает занятость абонентских линий. Если при этом диспетчеру не предоставляется преимущественных прав в установлении соединения (например, принудительный сброс занятого абонента), то диспетчерская телефонная связь превращается в обычную систему производственной автоматической телефонной связи.

В табл. 4.1 приводятся данные о некоторых особенностях моделей процесса доставки информации для ряда сетей производственной связи при фиксированных условиях их организации. В частности, было принято, что:

Таблица 4.1

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

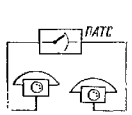
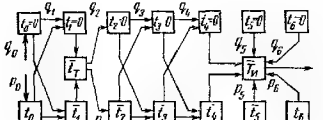
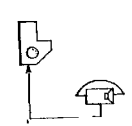
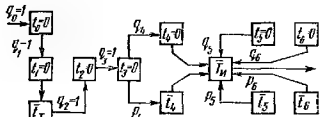
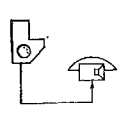
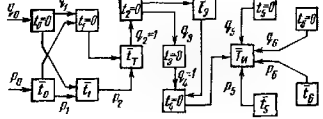
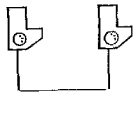
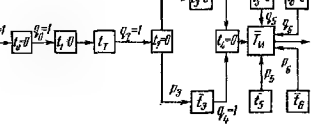
| Наименование сети | Элементы модели процесса доставки информации | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | подходы к средству связи | | ожидания освобождения занятого средства связи | | ожидания в процессе собственно установления соединения $t_2$ |
| | на исходящем конце $t_0$ | на входящем конце $t_4$ | на исходящем конце $t_1$ | на входящем конце $t_3$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Производственная автоматическая телефонная связь | Имеются | Имеются | Имеются | Имеются | Имеются |
| Диспетчерская телефонная связь: — связь от диспетчера | Отсутствуют, так как диспетчер постоянно находится за своим коммутатором | Имеются | Отсутствуют, так как коммутатором пользуется один диспетчер | Отсутствуют, так как абонент может разговаривать только с диспетчером | Отсутствуют, так как соединение осуществляется по прямой абонентской линии |
| — связь к диспетчеру | Имеются | Отсутствуют, так как диспетчер постоянно находится за своим коммутатором | Имеются | Имеются (диспетчер может быть занят другим разговором) | Отсутствуют, так как абонентские линии, по которым осуществляется соединение, подключаются непосредственно к коммутатору |
| — связь между диспетчерскими коммутаторами | Отсутствуют, так как диспетчеры постоянно находятся за своими коммутаторами | Отсутствуют, так как диспетчеры постоянно находятся за своими коммутаторами | Отсутствуют, так как коммутатором пользуется один диспетчер | То же | То же |

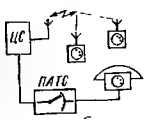
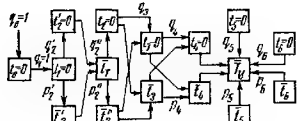
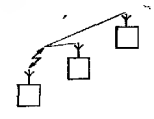
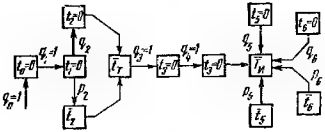
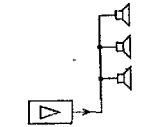
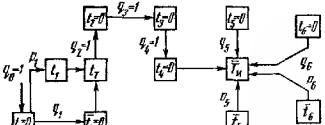
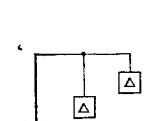
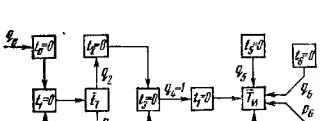
*Продолжение*

| Наименование сети | Элементы модели процесса доставки информации | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | подходы к средству связи | | ожидания освобождения занятого средства связи | | ожидания в процессе собственно установления соединения $t_3$ |
| | на исходящем конце $t_0$ | на входящем конце $t_4$ | на исходящем конце $t_1$ | на входящем конце $t_2$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Система связи с подвижными объектами типа «Алтай» (связь к абонентам АТС) | Отсутствуют, так как абонент находится в непосредственной близости от радиостанции | Имеются | Отсутствуют, так как радиостанцией пользуется один абонент | Имеются | Имеются (на центральной станции системы «Алтай» и АТС) |
| Диспетчерская радиотелефонная связь | То же | Отсутствуют, так как абонент находится в непосредственной близости от радиостанции | То же | Отсутствуют, так как в противном случае не может быть вообще осуществлен вызов | Имеются (одним радиоканалом пользуется группа радиостанций) |
| Производственная громкоговорящая связь: | | | | | |
| — с центральным усилителем (связь от диспетчера) | Отсутствуют, так как передача осуществляется с рабочего места диспетчера, на котором постоянно находится дежурный | Отсутствуют, так как абонент воспринимает информацию на своем рабочем месте | Имеются (передача осуществляется одним лицом, и поступившие сообщения могут образовывать очередь) | Отсутствуют, так как абонент по этой сети не ведет никаких передач | Отсутствуют, так как все соединения осуществляются одним и тем же лицом |
| — с абонентскими усилителями (связь между абонентами) | Имеются (абонент должен подойти к аппарату для осуществления передачи) | То же | Отсутствуют для циркулярных систем, так как абоненты могут разговаривать по сети вместе; имеются для избирательных систем | Отсутствуют для циркулярных систем, так как все аппараты постоянно включены на связь; имеются для избирательных систем | Имеются |
| Телеграфная связь: | | | | | |
| — двух аппаратов между собой в сети диспетчерской связи | Имеются | Отсутствуют, так как телеграмма может быть передана в отсутствие вызываемого абонента | Имеются (передача осуществляется одним лицом, и поступившие сообщения могут образовывать очередь) | Отсутствуют, так как связь может осуществляться только между двумя аппаратами | Отсутствуют, так как связь может осуществляться только между двумя аппаратами |
| — при связи в сети абонентского телеграфа | То же | То же | Имеются | Имеются | Имеются |

Таблица 4.2

СТРУКТУРА, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СОСТОЯНИЯ СЕТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

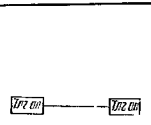
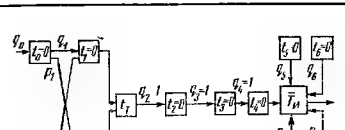
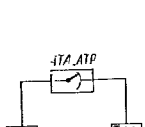
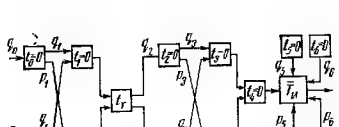
| Наименование сети | Структура сети | Математическая модель | Состояния: общее кол-во | Состояния: вероятности | Состояния: непроизводительные затраты времени |
|---|---|---|---|---|---|
| Производственная автоматическая телефонная связь |  |  | 128 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=p_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0p_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_{127}=q_0p_1p_2p_3p_4p_5p_6$<br>$P_{128}=p_0p_1p_2p_3p_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_0+t_т$<br>$T_3=t_1+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{127}=t_1+t_2+t_3+t_4+t_5+t_6+t_т$<br>$T_{128}=t_0+t_1+t_2+t_3+t_4+t_5+t_6+t_т$ |
| Диспетчерская телефонная связь: связь от диспетчера |  |  | 8 | $P_1=q_0\widehat{q}_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=q_0q_1q_2q_3p_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1q_2q_3q_4p_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_7=q_0q_1q_2q_3q_4p_5p_6$<br>$P_8=q_0q_1q_2q_3p_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_4+t_т$<br>$T_3=t_5+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_7=t_5+t_6+t_т$<br>$T_8=t_4+t_5+t_6+t_т$ |
| связь к диспетчеру |  |  | 32 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=p_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0p_1q_2p_3q_4q_5p_6$<br>. . . . . .<br>$P_{31}=q_0p_1q_2q_3q_4p_5p_6$<br>$P_{32}=p_0p_1q_2p_3q_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_0+t_т$<br>$T_3=t_1+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{31}=t_1+t_3+t_5+t_6+t_т$<br>$T_{32}=t_0+t_1+t_3+t_5+t_6+t_т$ |
| связь между диспетчерами |  |  | 8 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=q_0q_1q_2p_3q_4p_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1q_2q_3p_4p_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_7=q_0q_1q_2q_3p_4p_5p_6$<br>$P_8=q_0q_1q_2p_3p_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_3+t_т$<br>$T_3=t_5+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_7=t_5+t_6+t_т$<br>$T_8=t_3+t_5+t_6+t_т$ |

| Наименование сети | Структура сети | Математическая модель |
|---|---|---|
| Автоматизированная система связи с подвижными объектами типа «Алтай» (связь с абонентам АТС) |  |  |
| Производственная громкоговорящая связь: диспетчерская радиотелефонная связь |  |  |
| односторонняя |  |  |
| двусторонняя циркулярная |  |  |



*Продолжение*

| общее кол-во | Состояния: вероятности | Состояния: непроизводительные затраты времени |
|---|---|---|
| 64 | $P_1=q_0q_1q_2'q_2''q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=q_0q_1p_2'q_2''q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1q_2'p_2''q_3q_4q_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_{63}=q_0q_1q_2'p_2''p_3p_4p_5p_6$<br>$P_{64}=q_0q_1p_2'p_2''p_3p_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_2'+t_т$<br>$T_3=t_2''+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{63}=t_2''+t_3+t_4+t_5+t_6+t_т$<br>$T_{64}=t_2'+t_2''+t_3+t_4+t_5+t_6+t_т$ |
| 8 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=q_0q_1p_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1q_2p_3q_4p_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_7=q_0q_1q_2q_3q_4p_5p_6$<br>$P_8=q_0q_1p_2q_3q_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_2+t_т$<br>$T_3=t_3+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_7=t_5+t_6+t_т$<br>$T_8=t_2+t_5+t_6+t_т$ |
| 8 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=q_0q_1q_2q_3q_4p_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1q_2q_3q_4q_5p_6$<br>. . . . . .<br>$P_7=q_0q_1q_2q_3q_4p_5p_6$<br>$P_8=q_0p_1q_2q_3q_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_5+t_т$<br>$T_3=t_6+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_7=t_5+t_6+t_т$<br>$T_8=t_1+t_5+t_6+t_т$ |
| 16 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=p_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0q_1p_2q_3q_4q_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_{15}=q_0q_1p_2q_3q_4p_5p_6$<br>$P_{16}=p_0q_1p_2q_3q_4p_5p_6$ | $T_1=T_т$<br>$T_2=t_0+t_т$<br>$T_3=t_2+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{15}=t_2+t_5+t_6+t_т$<br>$T_{16}=t_0+t_2+t_5+t_6+t_т$ |

| Наименование сети | Структура сети | Математическая модель |
|---|---|---|
| Диспетчерская телеграфная связь |  |  |
| Абонентский телеграф |  |  |

Примечание. ПАТС — производственная автоматическая телефонная станция; ЦС — центральная станция системы связи с подвижными объектами; АТА, АТР — станции абонентского телеграфа соответственно автоматического и ручного обслуживания.

а) оконечные (абонентские) устройства размещены таким образом, что абоненты могут их использовать, при этом каждой радиостанцией всегда пользуется одно лицо, которое постоянно находится возле нее;

б) диспетчерская связь не автоматизирована — абонент может вести переговоры только с диспетчером;

в) за диспетчерским коммутатором всегда находится дежурный оператор (в таблице для удобства он назван просто диспетчером);

г) диспетчерские коммутаторы соединены между собой прямыми линиями;

д) управление работой (в том числе и передача информации) усилителя производственной громкоговорящей связи осуществляется только с рабочего места диспетчера.

Если какие-либо из перечисленных условий не выполняются, то должны быть образованы соответствующие модификации моделей. В табл. 4.1 не рассматриваются элементы модели, которые отображают увеличение затрат времени при осуществлении собственно передачи информации за счет недостаточных качества и надежности разговорного тракта, так как эти элементы присутствуют в моделях всех сетей производственной связи. Таблицей также не



*Продолжение*

| Состояния | | |
|---|---|---|
| общее кол-во | вероятность | непроизводительные затраты времени |
| 16 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=p_4q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0p_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_{15}=p_0p_1q_2q_3q_4p_5q_6$<br>$P_{16}=p_0p_1q_2q_3q_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_0+t_т$<br>$T_3=t_1+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{15}=t_0+t_1+t_5+t_т$<br>$T_{16}=t_0+t_1+t_5+t_6+t_т$ |
| 64 | $P_1=q_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_2=p_0q_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>$P_3=q_0p_1q_2q_3q_4q_5q_6$<br>. . . . . .<br>$P_{63}=p_0p_1p_2p_3q_4p_5q_6$<br>$P_{64}=p_0p_1p_2p_3q_4p_5p_6$ | $T_1=t_т$<br>$T_2=t_0+t_т$<br>$T_3=t_2+t_т$<br>. . . . . .<br>$T_{63}=t_0+t_1+t_2+t_3+t_5+t_т$<br>$T_{64}=t_0+t_1+t_2+t_3+t_5+t_6+t_т$ |

центральная станция системы связи с подвижными объектами; АТА, АТР — станции або-

охватываются некоторые сети и их разновидности, но они не вносят каких-либо принципиальных или даже существенных изменений в высказанные выше положения.

Наличие одних и тех же элементов в составе модели разных сетей не дает права отождествлять их между собой, поскольку сети отличаются не только составом элементов, но и их количественными характеристиками (вероятностями, математическими ожиданиями затрат времени). Естественно, что количественные характеристики отдельных элементов модели для различных сетей неодинаковы. В сети производственной автоматической телефонной связи для оценки эффективности ее функционирования решающее значение имеет группа элементов, которая характеризует процесс установления соединения. Для прямой и производственной громкоговорящей связи, наоборот, эти элементы имеют менее существенное значение по сравнению с процессом собственно передачи информации. Указанный перечень отличий сетей производственной связи между собой с точки зрения механизма их функционирования можно было бы продолжить.

В табл. 4.2 приводятся математические модели некоторых сетей производственной связи, составленные с учетом данных табл. 4.1. Из табл. 4.2 видно, что сети отличаются как по количеству эле-

ментов, входящих в математическую модель при сделанных выше допущениях по организации связи, так и по числу возможных состояний. Особенности рассматриваемых сетей находят отражение в формулах подсчета состояний и величин затрат времени.

В модели процессов доставки информации в системе связи с подвижными объектами непроизводительные затраты времени в процессе собственно установления соединения разделены на два подэлемента — затраты времени на установление соединения на центральной станции системы (обозначены с одним штрихом) и на ПАТС (обозначены с двумя штрихами).

Число элементов, входящих в состав модели, может быть определено либо непосредственно по графе 3 (путем перечисления элементов, имеющих два значения величины непроизводительных затрат времени $t_i$ и $t_i=0$), либо по графе 4 по формуле $n'=0{,}144 \ln z$, где $n'$ — число элементов модели (без $t_т$ и $T_п$); $z$ — число состояний по графе 4 табл. 4.2.

Приведенные в табл. 4.2 модели сетей производственной связи достаточны для расчета эффективности функционирования этих сетей. Показатели эффективности рассчитываются для каждой сети в отдельности для часа наибольшей нагрузки в предположении, что входящий поток требований — пуассоновский, а время обслуживания — показательное.

Представим, что модель сети состоит всего из одного элемента. Тогда эффективность ее функционирования в соответствии с (3.12) может быть выражена в виде

$$E = \sum_{i=0}^{1} P_i \frac{T_и}{T_и + T_{пi}} = q \frac{T_и}{T_и + 0} + (1-q)\frac{T_и}{T_и + T_п} = \frac{1 + q\dfrac{T_п}{T_и}}{1 + \dfrac{T_п}{T_и}}, \quad (4.1)$$

где $T_п$ — общее время непроизводительных затрат в сети связи, отнесенное к одному разговору; $T_и$ — математическое ожидание продолжительности одного разговора. Как и везде, в данной главе принято, что $p=1-q$.

На основе ф-лы (4.1) при разных величинах отношения $T_п/T_и$ можно получить зависимости $E=F(q)$, которые представлены на рис. 4.1. Из рисунка следует, что эффективность функционирования монотонно возрастает с увеличением величины $q$ и тем резче, чем больше отношение $T_п/T_и$.

Зафиксировав состояния сети производственной связи и варьируя величиной времени собственно передачи информации $T_и$, из ф-лы (4.1) можно получить также функцию $E=F(T_п)$. На рис. 4.2 эта функция представлена для сети, на которой $q=0$ и $T_п=200$ с (перегруженная сеть производственной автоматической телефонной связи), а на рис. 4.3 — для сети, на которой $q=0{,}9$ и $T_п=25$ с (диспетчерская телефонная связь). Из сравнения рис. 4.2 и 4.3 видно, что обе кривые имеют один и тот же характер. Если продолжить

кривые вправо, то обнаружится наличие максимума функции $E=f(T_и)$, что следует из ф-лы (4.1) (величина $T_и$ входит и в числитель и в знаменатель). Наличие максимума указывает на суще-

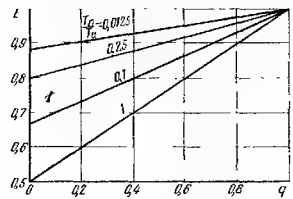



Рис. 4.1. Зависимость эффективности функционирования $E$ от вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени $q$

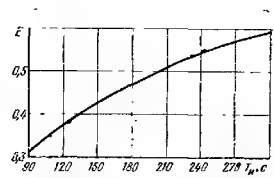



Рис. 4.2. Зависимость эффективности функционирования $E$ от величины $T_и$ для сети производственной автоматической телефонной связи ($p_i$=const; $T_{пi}$=const; $q_i=1-p_i$)

ствование оптимальных условий передачи по сети связи тех или иных сообщений. При некоторых условиях этот максимум находится правее реально используемых значений $T_и$, что свидетельствует о том, что сеть не является оптимальной. В других случаях, как будет показано ниже, максимум оказывается в пределах практически используемых значений величины $T_и$. Возникает задача определения величины $T_и$, при которой эффективность для данной сети связи будет максимальна.

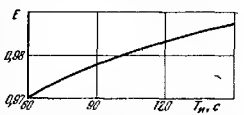



Рис. 4.3. Зависимость эффективности функционирования $E$ от величины $T_и$ для сети диспетчерской телефонной связи ($p_i$=const; $T_{пi}$=const; $q_i=1-p_i$)

Однако определить указанный максимум аналитически, как правило, не представляется возможным. Поэтому для решения этой задачи должны быть использованы численные методы, которые позволяют применять быстродействующую вычислительную технику.

Прежде чем рассмотреть функционирование отдельных сетей производственной связи, необходимо сделать одно общее замечание относительно времени собственно передачи информации $T_и$. Это время при передаче речевой, а иногда и текстовой информации во многом зависит от способа кодирования ее словами и фразами. Одно и то же сообщение можно передать по-разному, как один и тот же факт может быть выражен телеграфной фразой, стихотворением, рассказом и даже романом. Данное обстоятельство делает менее определенным понятие величины $T_и$. Однако в производственных условиях передаваемая информация имеет ограниченную тематику и менее разнообразные формы ее кодирования словами,

чем на сетях общего пользования. Можно принять допущение, что на сетях производственной связи два сообщения, передача которых потребовала одно и то же время $T_и$, содержат одинаковое количество информации «по смыслу».

## 4.2. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ ТЕЛЕФОННАЯ СВЯЗЬ

*Назначение* Производственная автоматическая телефонная связь (ПАТС) предназначена для передачи информации внутри промышленных предприятий, строительных организаций, производственных объединений. Основной особенностью этой сети является предоставление ее абонентам возможности широкого выбора корреспондентов для установления временных соединений и передачи необходимой информации. Если абоненты сетей диспетчерской и директорской телефонной связи могут обмениваться информацией, как правило, с одним лицом (диспетчером, директором), то каждый абонент рассматриваемой сети может практически независимо от действий других абонентов данной сети устанавливать соединение с $N-1$ корреспондентами (где $N$ – емкость сети ПАТС) и с любым количеством абонентов общегосударственной телефонной сети (в случае, если ПАТС имеет выход на ГТС).

В тех случаях, когда функциональные связи между абонентами заранее определены, исходя из организационной структуры управления производством, и когда эти связи оказываются достаточно загруженными, применяются средства прямой (некоммутируемой) проводной или радиосвязи, обеспечивающие большую эффективность функционирования системы доставки информации. Однако управление любым современным производством представляет собой сложный вероятностный процесс, в ходе которого возникает потребность в передаче информации между абонентами, которые не имеют в организационной структуре управления производством жестко закрепленных взаимосвязей или эти взаимосвязи заранее определены как недостаточно информационно напряженные. В таком случае не требуется организовывать эффективную, но дорогостоящую прямую связь и применение сети ПАТС оправдывается как техническими (невозможно каждого абонента соединить с каждым прямыми линиями), так и экономическими соображениями.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что по степени загруженности производственной АТС на предприятии (при достаточном развитии средств прямой связи) можно косвенно судить об удельном весе случайных факторов в процессе управления производством. Например, количество вызовов с одного телефонного аппарата АТС в строительстве в 1,5–2 раза выше, чем на предприятиях горнорудной и металлургической промышленности, процессы управления которыми более детерминированы. Повышенную телефонную нагрузку создают органы материально-технического

снабжения (отделы снабжения и сбыта заводов, управления комплектации в строительстве и т. д), но при осуществлении любых мероприятий, направленных на упорядочение системы снабжения (например, перевод на поточную поставку потребителям требуемых грузов) нагрузка, поступающая от этих органов на АТС, резко падает.

*Схема организации связи.* Предоставление всем абонентам рассматриваемой сети равных возможностей в установлении соединения друг с другом предопределяет следующие следствия.

1. Данная сеть является коммутируемой, т. е. обеспечивается выбор разных абонентов с использованием одних и тех же абонентских, линейных и станционных устройств.

2. Сеть строится по территориальному принципу, т. е. включение абонентов производится, исходя из их местоположения на территории предприятия, а не по роли в организационной структуре управления, содержания передаваемой информации, ее количества и т. д.

Возможность с помощью автоматических телефонных станций выбирать большое количество направлений связи, а также универсальность телефонной связи (по линиям телефонной связи могут быть переданы не только все виды речевых, но и телеграфных сообщений, а также фототелеграммы и сигналы дистанционного управления) позволяют использовать АТС для коммутации выходов на другие сети производственной связи (радио, распорядительно-поисковой, звукозаписи и др.). Вследствие этого открывается перспектива образования систем связи в масштабе крупных промышленных предприятий, систем, включающих в себя значительное количество сетей связи и позволяющих абонентам с помощью одного и того же оконечного устройства пользоваться этими сетями. Указанные возможности АТС в настоящее время используются на целом ряде промышленных предприятий и в строительстве

Таким образом, производственная автоматическая телефонная связь хотя и имеет меньшую эффективность функционирования по сравнению с некоммутируемыми сетями связи (из-за возможности занятости соединительных путей и вызываемого абонента), но позволяет использовать различные сети производственной связи комплексно, что повышает оперативность доставки информации, а также предоставляет абонентам большее удобство пользования связью. При этом важно подчеркнуть, что причина и указанного недостатка (меньшая эффективность функционирования) и преимущества (системные возможности) одна и та же — наличие коммутационных устройств.

На рис. 4.4 приведена схема организации производственной автоматической телефонной связи на базе координатной станции типа УПАТС-100/400. Кроме связи абонентов между собой, станции этого типа позволяют подключаться привилегированному абоненту к занятому другим соединением абоненту, переключать входящий вызов к другому абоненту, выходить на блоки дополнитель-

ных услуг, входящие в комплект станции. Абоненты, включенные в УПАТС-100/400 по схеме рис. 4.4, могут выйти на сеть радиосвязи (симплексной или дуплексной), на усилитель производственной громкоговорящей связи, диктофон, автоинформатор. При этом может быть выбрано не только направление к той или иной сети производственной связи, но и требуемые центральная радиостан-

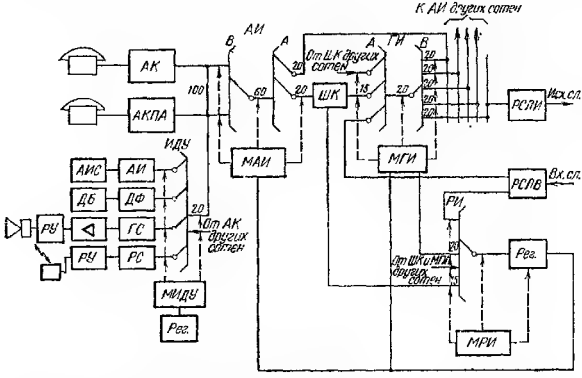



Рис. 4.4. Схема организации производственной автоматической телефонной связи на базе координатной станции типа УПАТС-100/400:

*АК* — абонентский комплект; *АКПА* — абонентский комплект привилегированного абонента; *АИ* — ступень абонентского искания; *ГИ* — ступень группового искания; *РИ* ступень регистрового искания; *ИДУ* ступень искания дополнительных услуг; *МАИ, МГИ, МРИ, МИДУ* — маркеры соответствующих ступеней искания; *ШК* — шнуровой комплект; *РСЛИ, РСЛВ* — реле сл исходящих и входящих комплектов; *Рег* — регистр; *АИ* — блок выхода на автоинформатор; *ДФ* — блок выхода на диктофон. *ГС* — блок выхода на центральный усилитель производственной громкоговорящей связи; *РС* — блок выхода на радиостанцию; *АИС* — автоматическая информационная станция; *ДБ* — диктофонное бюро; *РУ* — распределительное устройство выбора фидера сети производственной громкоговорящей связи с центральным усилителем или сети радиосвязи

ция или фидер сети производственной громкоговорящей связи с центральным усилителем. Для этих целей блоки громкоговорящей связи ГС, радиосвязи РС транслируют импульсы набора номера с телефонного аппарата в соответствующие распределительные устройства. С помощью набора определенных цифр номера производится автоматическое дистанционное управление работой усилителей, радиостанций, а также (через блоки АИ и ДФ) автоинформатора и диктофона. Например, при разговоре по симплексной радиосвязи абонент ПАТС набором тех или иных цифр переключает радиостанцию с приема на передачу и, наоборот, при

пользовании диктофоном переводит его из режима «запись» в режим «воспроизведение» и т. д.

Схемой УПАТС-100/400 предусматривается индивидуальное ограничение выхода на те или иные направления связи, а также организация транзитной связи, используемой в основном в условиях железнодорожной связи (на рис. 4.4 не показана).

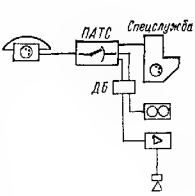
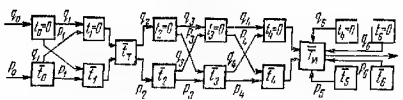
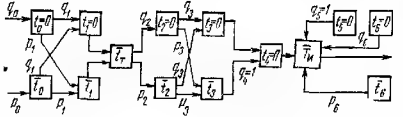
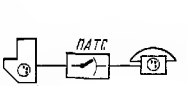
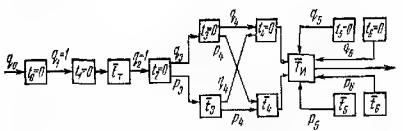
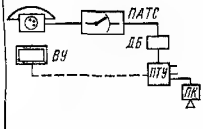
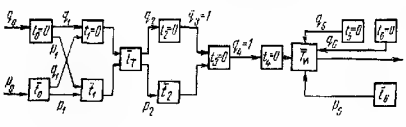
В перспективе на сетях производственной автоматической телефонной связи намечается использовать телефонные аппараты с клавишным набором номера, включенные в квазиэлектронные АТС. Огромные возможности применения электроники для коммутации сообщений [59] позволяют предполагать, что эти станции обеспечат значительно больший круг дополнительных услуг, чем, например, координатные станции. Помимо перечисленных выше возможностей переключения поступившего вызова, подключения к занятому абоненту с сохранением секретности переговоров, выхода на блоки дополнительных услуг и транзитной связи, а через них к радиосети, сети звукозаписи и т. д., квазиэлектронные АТС обеспечивают связь совещаний по телефону, поисковую сигнализацию. В этой книге вопросы доставки информации в сетях, оборудованных квазиэлектронными АТС, не рассматриваются.

*Модель процесса доставки информации.* В табл. 4.2 приведена модель процесса доставки информации в сети производственной автоматической телефонной связи при соединении двух абонентов между собой. Было показано, что эта модель может находиться в 128 возможных состояниях и что она является весьма общей, т. е. модели остальных сетей производственной связи могут быть образованы с помощью тех же элементов. Однако, как указывалось выше, обеспечение связи абонентов ПАТС между собой не исчерпывает возможностей организации производственной автоматической телефонной связи. Абоненты, включенные в ПАТС, могут выходить на другие сети производственной связи (диспетчерскую телефонную связь, производственную громкоговорящую связь с центральными и абонентскими усилителями, устройства звукозаписи и промышленного телевидения, сети радиосвязи и др.), специальные службы и пользоваться междугородной телефонной связью. Многообразие форм осуществления процессов доставки информации в сети производственной автоматической телефонной связи видно из табл. 4.3. Здесь приведено несколько схем организации связи и соответствующие им модели, являющиеся модификациями модели, приведенной в табл. 4.2 для схемы связи абонентов ПАТС между собой.

В табл. 4.3 некоторые связи имеют совпадающие модели (абонент ПАТС — диспетчерский коммутатор, абонент ПАТС — спецслужбы и т. д.) по числу входящих в их состав элементов. Однако они могут отличаться между собой количественными характеристиками (вероятностями состояний, величинами непроизводительных затрат времени) отдельных элементов в зависимости от конкретных условий организации сети

Таблица 4.3

НЕКОТОРЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ И МОДЕЛИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ

| Направление связи | Схема организации связи | Модель процесса доставки информации | Число возможных состояний |
|---|---|---|---|
| Абонент ПАТС—диспетчерский коммутатор<br>Абонент ПАТС—спецслужбы<br>Абонент ПАТС—звукозаписывающее устройство |  |  | 128 |
| Абонент ПАТС—центральный усилитель производственной громкоговорящей связи—громкоговоритель | |  | 32 |
| Междугородная телефонная станция—абонент ПАТС |  |  | 16 |
| Абонент ПАТС—ПТУ |  |  | 16 |

Примечание. ДБ — дополнительный блок, устанавливаемый на ПАТС; ПТУ — промышленная телевизионная установка; ПК — передающая камера; ВУ — видеоприемное устройство.

Схемы организации связи абонентов ПАТС с радиостанциями, а также соответствующие им модели описываются в разд. 4.4 и 4.5. Использование ПАТС в системах автоматизированной диспетчерской связи рассматривается в следующем разделе. Если абонент ПАТС одновременно является лицом, у которого размещается видеоприемное устройство системы промышленного телевидения, то коммутационное оборудование телефонной станции может использоваться и для выбора направления к соответствующей телевизионной камере и передачи по образованному тракту сигналов управления ее работой. Телевизионные изображения передаются по отдельным кабелям. Модель процесса доставки информации в данном случае обладает некоторыми специфическими особенностями: «подход к средству связи на входящем конце» присутствует при каждой реализации процесса и представляет собой время, необходимое для приведения передающей камеры и видеоприемного устройства в рабочее состояние; время собственно передачи информации $T_и$ здесь является временем передачи не по сети ПАТС, а по сети промышленного телевидения телевизионного изображения; продолжительность передачи из-за недостаточного качества тракта в рассматриваемой системе не может быть увеличена (если качество изображения недостаточно, то его нельзя компенсировать увеличением продолжительности передачи, как при разговорной речи).

Не входящие в табл. 4.3 модели связи абонента ПАТС с абонентами других городов по сети полуавтоматической или автоматической междугородной связи могут быть уложены в рамки модели обычной связи двух абонентов между собой за счет расширения понятия элемента «ожидания в процессе собственно установления соединения». Сначала этот элемент должен быть разложен на составляющие его части (установление соединения на ПАТС, ГТС, МТС данного города и т. д.) для определения математического ожидания величины непроизводительных затрат времени по всему тракту соединения, а также соответствующих вероятностей. Затем может быть произведен расчет обычным порядком с учетом соответствующих количественных характеристик указанного элемента.

*Алгоритм расчета эффективности функционирования.* Все расчетные формулы для определения вероятностных характеристик и математических ожиданий непроизводственных затрат времени в каждом элементе были приведены в табл. 2.2 и гл. 3. Там же рассматривались принятые допущения и ограничения. Здесь излагается алгоритм расчета эффективности функционирования схемы связи двух абонентов между собой. При незначительной модификации этот алгоритм можно применить и для расчета эффективности функционирования других схем связи.

Алгоритм, представленный на рис. 4.5, является достаточно общим, и его особенности каждый раз при пользовании им будут определяться применяемыми расчетными формулами, значениями по-

стоянных коэффициентов, устанавливаемыми ограничениями. Однако данный алгоритм позволяет определить эффективность функционирования не по 128, а только по 64 возможным состояниям сети: фактор надежности из рассмотрения здесь исключен не из-за

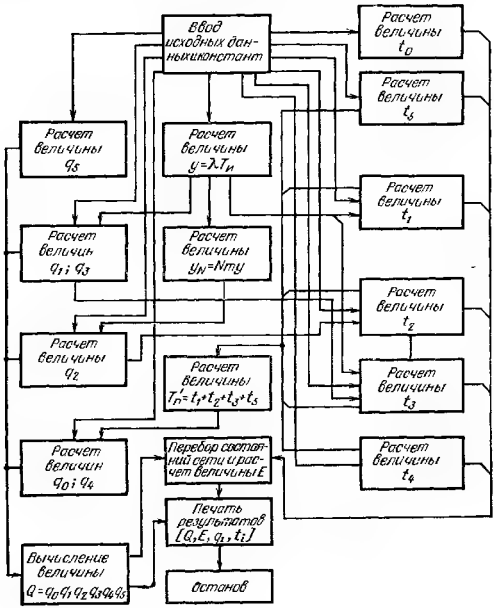



Рис. 4.5. Функциональная схема алгоритма расчета величин $E$ и $Q$ для сети производственной автоматической телефонной связи при идеальной надежности

вычислительных, а методологических трудностей — неизвестно, как рассчитать надежность сети ПАТС. Корректировка алгоритма, направленная на добавление еще одного элемента модели, может быть осуществлена очень простым способом.

Исходя из методики определения величины эффективности функционирования, главным моментом алгоритма является перебор всех возможных состояний сети. Перебор осуществляется таким

методом: каждому состоянию ставится в соответствие шестизначное число в двоичной системе, т. е. состоящее из нулей и единиц. Вероятность каждого состояния $P_k$ рассчитывается как произведение шести вероятностей, определяющих каждое из 64 состояний, причем берется $p_i$, если на $i$-м месте шестизначного числа стоит единица, и $q_i$, если на $i$-м месте этого числа стоит нуль.

Величина непроизводительных затрат времени для каждого состояния $T_{пk}$ рассчитывается аналогично как сумма непроизводительных затрат времени в элементах $t_i$, причем берется $t_i=0$, если на $i$-м месте соответствующего шестизначного числа стоит нуль, и $t_i$, если на этом месте стоит единица.

Далее при заданном времени собственно передачи информации $T_и$ определяется вероятность $P_k = \frac{T_и}{T_и + T_{пk}}$ и производится суммирование по ф-ле (3.12) для всех 64 состояний сети.

Рассматривая формулы для расчета величин $p_i$, $q_i$ и $t_i$, приведенные в предыдущих главах, можно установить, что в них входит большое количество переменных параметров — число лиц, пользующихся одним телефонным аппаратом $m$; интенсивность потока $\lambda$; среднее расстояние абонента до телефона $L$; коэффициенты $\tau$, $\tau_{исх}$, $t_{i=0}$, характеризующие отдельные виды затрат, связанные с подходом к телефонному аппарату (см. разд. 3.4); продолжительность разговора $T_и$; фразовая разборчивость $J$; отношение числа абонентов, затухание линии связи которых меньше 13 дБ, к общему числу абонентов $N_{13}/N_{общ}$; продолжительность шума, имеющего уровень свыше 40 дБ; число обслуживающих приборов $v$; коэффициент $\alpha$, учитывающий номер ступени искания, на которой произошел отказ. Таким образом, при расчете величины эффективности функционированной сети ПАТС необходимо как минимум рассматривать 12 различных параметров. При вариации исходными данными при расчете по формулам, определяющим требуемые величины $q_i$, $p_i$ и $t_i$, объем вычислений увеличивается пропорционально величине $\Lambda^{\xi}$, где $\Lambda$ — количество варьируемых параметров, $\xi$ — число возможных значений, которые может принимать каждый параметр. Так как в данной задаче число варьируемых параметров $\Lambda=12$, то уже при трех возможных значениях каждого из них ($\xi=3$) объем вычислений увеличивается почти в 1500 раз. Однако для того чтобы установить зависимость эффективности функционирования и оперативности связи от того или иного параметра, трех его значений явно недостаточно. Поэтому при расчетах, определяющих указанные зависимости, изменение каждого параметра (аргумента) целесообразно производить не при всех возможных значениях других параметров, а при некоторых фиксированных их значениях. В этом случае каждый из варьируемых параметров изменяется по всем своим возможным значениям, количество которых не ограничивается при постоянных значениях всех других параметров, соответствующих определенным уровням эффективности функционирования (оперативности). Нетрудно ви-

деть, что объем вычислений при принятой системе счета может оказаться в миллионы раз меньше полного перебора всех возможных значений рассматриваемых параметров. Количество вычислений, выполняемых в данном случае, равно произведению числа варьируемых параметров на число уровней эффективности функционирования и на суммарное число возможных значений, которые могут принимать каждый из варьируемых параметров.

В качестве критерия оперативности в алгоритме принята величина $t_т$. Следовательно, величина оперативной связи в рассматриваемом случае определяется просто как произведение вероятностей $q_i$, т. е. $Q=\prod_{i=0}^{5} q_i$.

*Численные результаты.* На основе алгоритма, приведенного на рис. 4.5, была составлена программа и выполнены соответствующие расчеты [1]) на ЭВМ «Минск-22М».

Рассматривались три уровня эффективности функционирования, соответствующие легким, тяжелым и очень тяжелым условиям функционирования сети. «Легкость» и «тяжесть» условий определялась заданием больших или меньших величин нагрузки, фразовой артикуляции, числа абонентов, пользующихся одним телефонным аппаратом и т. п. В расчетах величина $m$ варьировалась от 1 до 10 (10 значений); $\lambda$ равнялась 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 выз.·ч$^{-1}$ (5 значений); $T_н$ - 60; 90; 120, 150; 180; 210; 240; 270; 300 с (9 значений); $\tau_{исх}$ — 0; 0,1; 0,15; 0,20; 0,30; 0,50 (6 значений); $\tau$—0; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1 (5 значений); $L$ — 1; 3; 5; 7; 10; 15; 20; 25 м (8 значений); $J$—1; 0,98; 0,97; 0,96; 0,95; 0,94; 0,93; 0,92; 0,91 (9 значений); отношение $N_{1з}/N_{общ}$ — 1; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8 (5 значений); $t_{40}$ 0; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1 ч (7 значений); $v$ — 20; 17; 15; 13; 12; 11; 10; 7; 5; 4; 3; 2; приб./100 абонентов (12 значений). Во всех случаях было принято, что $\alpha=0{,}35$; $T_{окр}=10$ с; $\lambda_{исх}=\lambda_{вх}=\lambda/2$ и $t_{i=0}=0$. Таким образом, варьировалось 10 параметров по 3 уровням эффективности, причем общее количество дискретных значений, которое могут принимать варьируемые параметры, равно 76. Следовательно, было выполнено около 2300 расчетов. Единичный расчет требует, без учета времени на ввод и отладку программы, до 30 с чистого машинного времени.

Уровни эффективности функционирования были приняты следующие: I — уровень, соответствующий величинам $E=0{,}732$ и $Q=0{,}986$.

Варьируемые параметры в этом случае имеют следующие значения: $m=1$; $\lambda=0{,}1$; $T_н=0{,}017$ ч; $\tau_{исх}=\tau=0$; $L=1$ м; $J=1$; $N_{1з}/N_{общ}=1$; $t_{40}=0$; $v=20$.

II — уровень, соответствующий величинам $E=0{,}434$ и $Q=0{,}031$.

Варьируемые параметры имеют значения: $m=5$; $\lambda=1$; $T_н=0{,}041$ ч; $\tau_{исх}=0{,}2$; $\tau=0{,}05$; $L=10$ м; $J=0{,}95$; $N_{1з}/N_{общ}=0{,}9$; $t_{40}=0{,}05$ ч; $v=10$.

[1]) Программа составлена Т. П. Абрамовой. Ею же были выполнены все расчеты на ЭВМ «Минск-22М».

III — уровень, соответствующий величинам $E=0{,}163$ и $Q=0{,}0005$.

Варьируемые параметры равны: $m=10$; $\lambda=1{,}5$; $T_{\text{и}}=0{,}083$ ч; $\tau_{\text{исх}}=0{,}5$; $\tau=0{,}1$; $L=25$ м; $J=0{,}91$; $N_{13}/N_{\text{общ}}=0{,}8$; $t_{40}=0{,}1$; $v=5$.

Величина $Q$ была определена как произведение всех вероятностей $q_i$, кроме $q_0$ и $q_4$, т. е. $Q=q_1q_2q_3q_5$.

Вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени, связанных с подходом на входящем и исходящем концах, $q_0$ и $q_4$ в рассчитываемых вариантах очень малы (приближаются к нулю). Наоборот, все остальные вероятности $q_i$ близки к единице. Такое решение о представлении величины $Q$ было принято исключительно из соображений наглядности: в противном случае было бы сложнее заметить разницу между различными уровнями эффективности функционирования по величине оперативности связи.

На рис. 4.6 приведены зависимости эффективности функционирования и оперативности связи от числа лиц, пользующихся одним телефонным аппаратом ($m$). Эти зависимости имеют тенденцию к уменьшению с увеличением числа $m$, причем чем ниже уровень эффективности, тем зависимость уменьшается резче. Из рисунка следует, что эффективность функционирования в зависимости от уровня изменяется более плавно, чем оперативность. Это положение сохраняется и при рассмотрении других зависимостей.

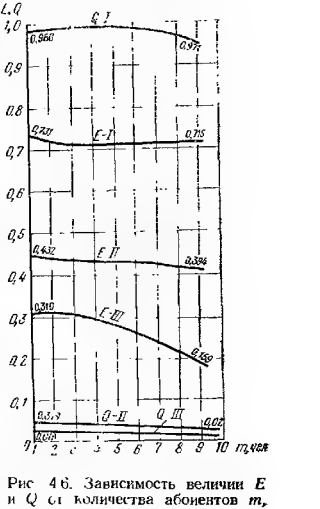



Рис 4.6. Зависимость величин $E$ и $Q$ от количества абонентов $m$, пользующихся одним телефонным аппаратом.

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

На рис. 4.7 представлены зависимости эффективности функционирования и оперативности связи от интенсивности потока вызовов $\lambda$. Убывание этих функций с ростом величины $\lambda$ происходит намного быстрее, чем на рис. 4.6 в зависимости от величины $m$. Последнее свидетельствует о том, что при всех прочих равных условиях изменение интенсивности потока, а следовательно, и нагрузки оказывает большее влияние на величину эффективности функционирования и оперативности связи, чем $m$.

В отличие от зависимостей, приведенных на рис. 4.6 и 4.7, кривые эффективности функционирования на рис. 4.8 возрастают до экстремума, который весьма пологий, а уже потом плавно умень-

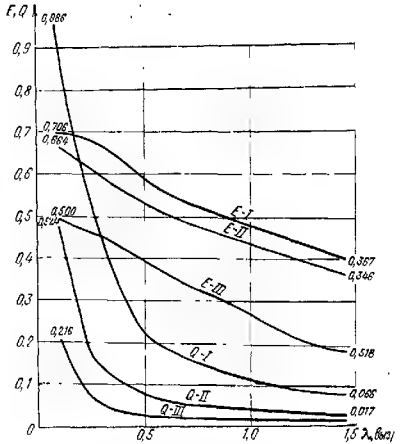



Рис. 4.7. Зависимость величин $E$ и $Q$ от интенсивности потока вызова $\lambda$.

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

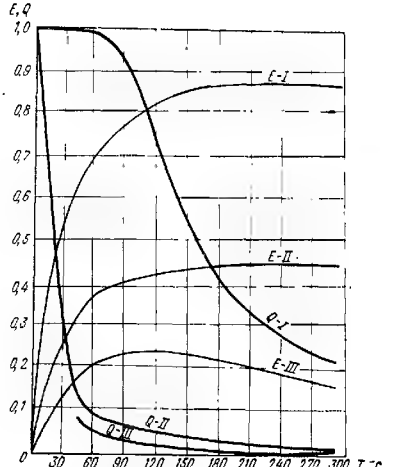



Рис. 4.8. Зависимость величин $E$ и $Q$ от продолжительности разговора $T_м$

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

шаются с ростом аргумента — времени чистого разговора $T_и$. Функция достигает экстремума тем быстрее, чем ниже уровень эффективности функционирования. Так, при III уровне он находится между 90 и 120 с; при I и II уровнях — за пределами 300 с. Наличие экстремума рассматриваемой функции следует из вида ф-лы (3.12).

Характер изменения зависимости оперативности связи, приведенной на рис. 4.8, тот же, что и на рис. 4.6 и 4.7. Продолжительность разговора наряду с величиной $\lambda$ оказывает на величину оперативности связи весьма существенное влияние. Другие характеристики процесса доставки информации — коэффициенты $\tau$ и $\tau_{исх}$, среднее расстояние от абонента до телефона $L$, фразовая артикуляция $J$, отношение $N_{13}/N_{общ}$, время $t_{40}$ — либо вообще практически не изменяют величину оперативности связи, либо оказывают на нее ограниченное влияние. Поэтому на основе анализа результатов расчетов можно сделать вывод о том, что оперативность связи, главным образом, определяется величинами интенсивности потока $\lambda$ и продолжительностью разговора $T_и$, т. е., по существу, телефонной нагрузкой $y$. Однако одна величина нагрузки не может однозначно установить уровень эффективности функционирования и оперативности связи. Это видно из рис. 4.9, на котором приведены зависимости $E$ и $Q$ от нагрузки. Кривые, соответствующие разным уровням эффективности функционирования и оперативности связи, имеют существенные отличия. Кривые оперативности при малых величинах нагрузки совпадают, а затем располагаются веером — кривые, соответствующие более низкому уровню оперативности связи, проходят ниже кривых, соответствующих более высокому уровню.

Кривые эффективности функционирования имеют следующую закономерность: при малых величинах нагрузки кривые, соответствующие более высокому уровню, располагаются выше кривых более низкого уровня; при больших величинах нагрузки имеет место обратная картина.

На рис. 4.9 показаны величины нагрузок $y_{12}$, $y_{13}$ и $y_{23}$, при которых соответствующие кривые пересекаются. При значениях нагрузки, близких к $y_{12}$ и $y_{13}$, кривые оперативности связи различных уровней заметно отличаются друг от друга; при достаточно большой величине нагрузки одному и тому же значению $y$ соответствуют разные значения эффективности функционирования, причем более низкий уровень может иметь большую величину $E$. Это еще раз подтверждает высказанное выше положение, что для любой сети параметры, характеризующие величину телефонной нагрузки, оказывают самое заметное влияние на величину эффективности функционирования, но, тем не менее, они не могут однозначно определить эту величину.

Для ответа на вопрос, почему вообще возможна такая ситуация, когда величина эффективности функционирования более высокого уровня оказывается меньше соответствующей величины более низ-

кого уровня эффективности функционирования, следует рассмотреть зависимости вероятностей непроизводительных затрат времени в элементах модели от определяющих их факторов. На рис. 4.10 приведены зависимости вероятностей отсутствия непроизводитель-

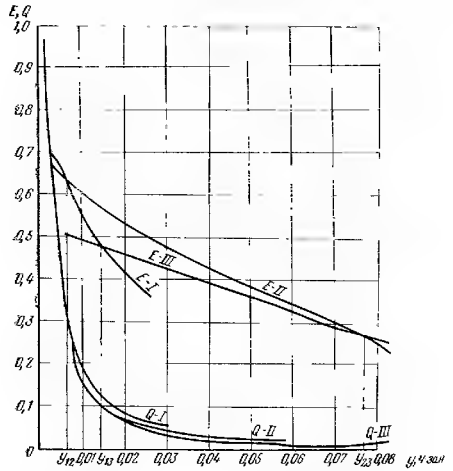



Рис. 4.9. Зависимость величин $E$ и $Q$ от величины телефонной нагрузки

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

ных затрат времени $q_1$ и $q_3$ и математических ожиданий этих затрат от количества абонентов $m$, пользующихся одним телефонным аппаратом. Из рисунка можно сделать некоторые весьма общие выводы:

а) вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени из-за ожидания освобождения занятого телефонного аппарата на исходящем и входящем концах $q_1$ и $q_3$ уменьшаются с увеличением числа $m$;

б) для одного и того же уровня эффективности функционирования величина $q_1$ всегда больше величины $q_3$;

в) величины непроизводительных затрат времени $t_1$ и $t_3$ возрастают с увеличением числа $m$;

г) для одного и того же уровня эффективности функционирования величина $t_1$ всегда больше величины $t_3$.

Первые два вывода справедливы и для других элементов модели, что можно увидеть и на примерах рис. 4.11 и 4.12. На этих же рисунках приведена зависимость величины $q_2$ от $\lambda$ и $T_и$, имеющая такой же характер, что и зависимости $q_1$ и $q_3$. Как и на рис. 4.10, здесь не приводится график изменения величины $q_5$, поскольку последняя от рассматриваемых параметров не зависит.

Вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени на подход к телефонному аппарату $q_0$ имеет совершенно отличный характер изменения в зависимости от рассматриваемых параметров. В то время как $q_1$, $q_2$ и $q_3$ уменьшаются с уменьшением уровня эффективности функционирования и увеличением величин $\lambda$ и $T_и$, величина $q_0$, наоборот, возрастает как с ростом указанных параметров, так и с уменьшением уровня эффективности функционирования. Возрастание $q_0$ может быть объяснено видом формул, приведенных в разд. 3.4. Физический смысл этого явления заключается в том, что чем больше величина телефонной нагрузки, тем большее время абонент вынужден проводить в непосредственной близости от телефонного аппарата и тем, следовательно, выше вероятность застать при очередном вызове абонента возле данного аппарата.

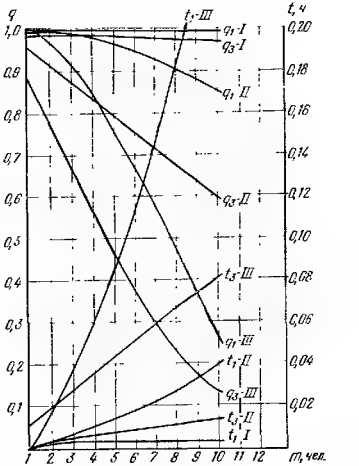



Рис. 4.10. Зависимости величин $q_1$, $q_3$ и $t_1$, $t_3$ от количества абонентов $m$, пользующихся одним телефонным аппаратом.

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

Вероятность $q_4$ имеет такой же характер изменения, что и $q_0$, но по абсолютной величине при прочих равных условиях $q_4 < q_0$. Это объясняется тем, что исходящие вызовы могут возникнуть в любой момент времени (даже, например, при предшествующем разговоре вызывающего абонента), а входящие вызовы – обязательно только в те отрезки времени, когда телефонный аппарат вызываемого абонента не занят другими разговорами.

Таким образом, вероятности отсутствия непроизводительных затрат времени $q_i$ при изменении уровня эффективности функционирования и величины телефонной нагрузки в различных элементах модели ведут себя по-разному: для одних элементов они умень-

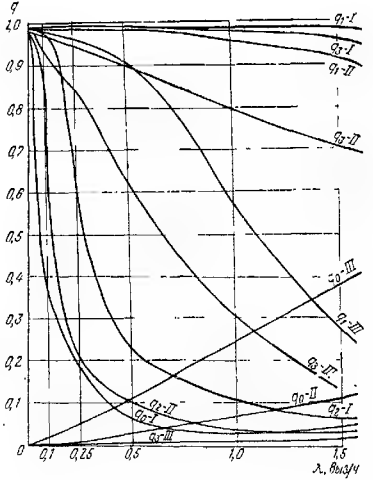



Рис. 4.11. Зависимость величин $q_0$, $q_1$, $q_2$ и $q_3$ от интенсивности потока вызовов $\lambda$

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

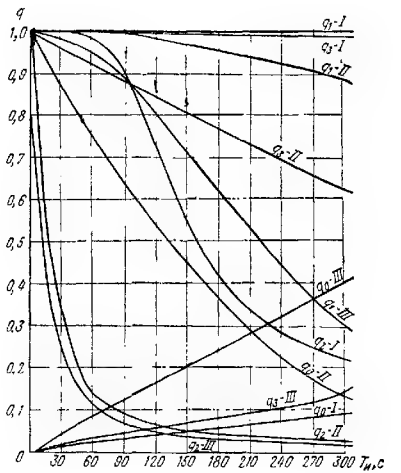



Рис. 4.12. Зависимость величин $q_0$, $q_1$, $q_2$ и $q_3$ от продолжительности разговора $T_и$.

Примечание. Римские цифры указывают уровень эффективности функционирования

шаются с увеличением нагрузки и уменьшением уровня, для других — возрастают. Можно сказать, что увеличение вероятностей $q_0$ и $q_4$ есть «защитная реакция» абонентов при ухудшении условий функционирования сети — они стремятся своим более частым личным присутствием возле телефонного аппарата компенсировать понижение уровня эффективности функционирования сети. До некоторых пор им это удается: разница между кривыми эффективностей функционирования, построенными для разных уровней в зависимости от величины нагрузки, оказывается не такой значительной, как в других случаях (см. рис. 4.6—4.8). Однако наступает момент, когда все абоненты находятся возле своих телефонов, а нагрузка продолжает возрастать: еще более резко уменьшаются величины $q_1$, $q_2$, $q_3$, а следовательно, падает эффективность функционирования, величина которой может стать меньше более низкого уровня, где «защитная реакция» еще продолжает действовать.

Следовательно, зависимость эффективности функционирования от величины нагрузки (рис. 4.9) определяется разницей противоположных по характеру влияний, оказываемых варьируемым параметром, с одной стороны, на величины $q_1$, $q_2$ и $q_3$, а с другой стороны, на величины $q_0$ и $q_4$.

На кривой оперативности связи эти противоположные процессы отражения не нашли, поскольку мы определяем величину оперативности как произведение всех $q_i$, за исключением $q_0$ и $q_4$. Поэтому уменьшение величины $Q$ при увеличении нагрузки происходит с соблюдением постоянной «иерархии» — кривые, соответствующие более высокому уровню, идут выше кривых, соответствующих более низкому уровню.

Рассмотренные графики показывают, что величины $E$ и $Q$ отражают многообразие процессов доставки информации в сети ПАТС с той степенью точности, которая позволяет выделить влияние каждого интересующего нас фактора на количественные характеристики всего процесса в целом. Большое количество этих факторов и их тесная взаимосвязь не только не затрудняют анализа функционирования сетей с помощью введенных характеристик, а, наоборот, делают эти характеристики чуть ли не единственными (кроме, конечно, экономических) количественными оценками, позволяющими сравнить между собой различные сети, выявить степень влияния каждого фактора, наметить пути оптимизации этих сетей.

*Оптимизация сети.* С помощью введенных характеристик эффективности функционирования сети связи и оперативности связи можно решать некоторые вопросы оптимизации сети, когда по каким-либо причинам экономические критерии в расчет не принимаются. Рассмотренный механизм расчета эффективности функционирования и оперативности показывает, что эти величины могут быть реально изменены путем варьирования числом телефонов, включенных в телефонную станцию, и числом искателей на АТС, обслуживающих поступающую нагрузку. Продолжительность раз-

говора $T_н$ путем декретирования может быть регламентирована в очень редких случаях, а применение для этих целей специальных технических средств (например, реле времени, которые срабатывают и разрывают разговорные цепи в момент, когда продолжительность разговора превысила заданную величину) в нашей стране не практикуется.

Величины $m$ и $\alpha$ целиком определяются емкостью станции — чем больше емкость, тем меньше лиц пользуется одним телефонным аппаратом и тем меньше расстояние от абонента до аппарата. Интенсивность потока вызовов, создаваемого одним абонентом в чнн, как и величина продолжительности разговора $T_н$, практически не поддается регламентации и может рассматриваться как заданная для данного производства. Регулирование параметров, определяющих качество и надежность разговорного тракта, как правило, приводит к тривиальным результатам: телефонные аппараты должны быть изолированы от внешнего шума; абонентские линии должны иметь затухание, не превышающее установленных норм; все элементы сети должны обладать максимальной надежностью.

Определение количества искателей (или соединительных линий) в практике проектирования телефонных станций применяется уже давно и подробно описано в литературе по телефонии. Суть такого определения сводится к тому, что задается требуемая величина потерь сообщения (в наших обозначениях $p_2 = 1 - q_2$), по которой при заданной величине поступающей нагрузки определяется требуемое количество приборов (или соединительных линий). При этом совершенно справедливо предполагается, что все остальные параметры сети (расстояние между абонентом и телефонным аппаратом, затухание абонентских линий и т. п.) никакого влияния на расчет не оказывают. Иными словами, предполагается, что оптимум величины количества приборов $v$ соответствует оптимуму эффективности функционирования сети в целом. Но поскольку количество приборов определяется при фиксированной величине $q_2$, а математическое ожидание непроизводительных затрат времени в процессе собственно установления соединения $t_2$ также определяется только величиной $q_2$, то, действительно, определенное указанным выше способом число $v$ при прочих равных условиях обеспечивает достижение величины эффективности функционирования сети (или оперативности связи) не ниже заданной.

Зависимость эффективности функционирования и оперативности от числа лиц, пользующихся одним аппаратом, и среднего расстояния между телефонными аппаратами и абонентом проявляется не в одном элементе модели (как при расчете числа приборов и соединительных линий), а, по крайней мере, в четырех — подходы и ожидание освобождения занятого телефонного аппарата на исходящем и входящем концах. Поэтому в данном случае расчет может быть выполнен только тогда, когда задана либо величина $E$, либо величина $Q$ для всей сети в целом. В остальном методика

расчета не отличается от методики расчета числа приборов и соединительных линий: задается требуемая величина оперативности или эффективности функционирования и с ее помощью по формулам, расчетным таблицам или графикам типа, показанных на рис. 4.6, определяется число $m$ и величина $L$, которые не должны превосходить фактические средние показатели сети.

В качестве примера рассмотрим такую ситуацию.

На промышленном предприятии работает 800 человек. Надо определить, сколько лиц $m$ могут пользоваться одним телефонным аппаратом, если все прочие параметры сети соответствуют III уровню эффективности функционирования и величина последней не менее 0,3.

Воспользовавшись графиком на рис. 4 6, находим точку пересечения прямой $E=0{,}3$ с кривой эффективности функционирования III уровня. Из этой точки опускаем перпендикуляр на ось абсцисс. Получаем $m=4$. Следовательно, емкость ПАТС должна быть не меньше 200 номеров, чтобы были выполнены условия поставленной задачи.

Совершенно аналогично может быть определена емкость станции и по графику $E=F(L)$ при соответствующей постановке задачи.

## 4.3. ДИСПЕТЧЕРСКАЯ И ДИРЕКТОРСКАЯ СВЯЗЬ

*Назначение.* Основное назначение прямой диспетчерской связи — обеспечение оперативного управления производством, снабжением, транспортировкой материалов и грузов. Сеть диспетчерской связи охватывает все звенья оперативного управления и строится в соответствии со структурой диспетчерского управления.

Система диспетчерского управления предъявляет определенные требования к организации диспетчерской телефонной связи. Важнейшими из них являются следующие:

1) состав абонентов диспетчерской связи должен быть таким, чтобы диспетчер имел возможность разрешать возникающие в ходе его деятельности вопросы;

2) диспетчер должен иметь возможность вести переговоры одновременно с несколькими абонентами;

3) диспетчер должен иметь возможность пользоваться, кроме телефонной, и другими видами производственной связи (радио, производственной громкоговорящей и др.) в комплексе;

4) технические средства диспетчерской телефонной связи должны обладать достаточной надежностью и обеспечивать удобство пользования ими.

Состав абонентов диспетчерской связи определяется с учетом всех особенностей работы диспетчерского персонала.

Разновидностью диспетчерской телефонной связи является директорская телефонная связь, предназначенная для обеспечения оперативной связи руководителя со своими подчиненными. Так как диспетчерская и директорская телефонные связи имеют одинаковое построение сетей, используют близкие по схеме и техническим характеристикам средства, то обычно их рассматривают совместно. Математические модели указанных сетей совпадают и по количеству элементов, и по количественным характеристикам (ве-

роятности состояний. математические ожидания затрат времени) этих элементов.

*Схема организации связи.* Диспетчерские и директорские коммутаторы (станции, установки) представляют собой простейшие телефонные станции, предназначенные для связи одного лица (оператора) с определенной группой абонентов. В случае диспетчерской связи оператором является диспетчер, в случае директорской — директор, начальник, управляющий.

В диспетчерский коммутатор прямой телефонной связи, устанавливаемый на любом уровне управления, включаются линии подчиненных ему абонентов и руководства, а также соединительные линии с коммутаторами других диспетчеров. В директорский коммутатор включаются абонентские линии подчиненных ему абонентов и соединительные — с коммутаторами вышестоящих руководителей.

Как правило, диспетчерские и директорские коммутаторы имеют соединительные линии с АТС. Соединение абонентов между собой или подключение абонентов к АТС путем соответствующих манипуляций оператора на коммутаторе принципиально возможно, но осуществляется как редкое исключение. В этом, в частности, состоит отличие коммутаторов прямой телефонной связи от ручных телефонных станций — директор или диспетчер не являются телефонистками, коммутаторы устанавливаются для облегчения их работы (повышения оперативности получения ими информации), а не для организации связи между подведомственными им абонентами.

Из изложенного следует, что связь в диспетчерской и директорской сетях может осуществляться в трех направлениях: от оператора (диспетчера или директора) к абоненту: от абонента к оператору; между двумя коммутаторами прямой телефонной связи. Схемы организации этих связей (см. табл 4.2) крайне просты и не нуждаются в каких-либо пояснениях. Однако такие простые схемы организации диспетчерской связи в ряде случаев не позволяют полностью удовлетворить потребности системы диспетчерского управления.

Для повышения оперативности доставки информации широко используются сети производственной громкоговорящей связи (см. разд. 4.6), являющиеся разновидностью диспетчерской телефонной связи, но имеющие свои специфические черты.

Диспетчерская телефонная связь позволяет организовывать совещания по телефону с участием либо нескольких, либо всех абонентов (СДС М-50/100; «Кристалл»). Для этих целей устанавливаются усилители у диспетчера (УД-2М) и у абонентов (УА-2). Схема организации такой связи приведена на рис. 4.13. Она отличается от схемы организации производственной громкоговорящей связи с абонентскими усилителями: типами применяемого оборудования, возможностью ведения в течение времени, незанятого совещаниями по телефону, обычных телефонных диспетчерских разговоров; соответствующей дисциплиной поведения участвующих в

совещании абонентов (свободное совещание, предоставление слова по усмотрению ведущего и т. д.).

В схеме, представленной на рис. 4.13, участники совещания слушают его ход по громкоговорителю (если установлен усилитель УА-2) или по телефону (если усилителя нет). В случае, если абоненту предоставляется слово, то он (после соответствующей коммутации на диспетчерском коммутаторе) говорит в микрофон своей микротелефонной трубки. При этом следует отметить, что при использовании усилителя УА-2 передача может быть осуществлена только после снятия абонентом микротелефонной трубки с рычажного переключателя усилителя, т. е. после отключения усилителя.

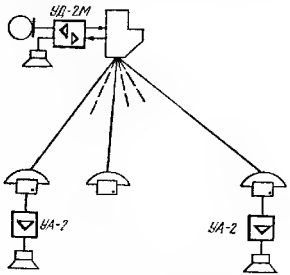


Рис. 4.13. Схема организации диспетчерского совещания

На рис. 4.14 изображена схема организации избирательной связи, применяемая на железнодорожном транспорте и являющаяся также разновидностью диспетчерской телефонной связи. К одной линии параллельно подключается ряд промежуточных пунктов, каждый из которых вызывается посылкой с диспетчерской станции

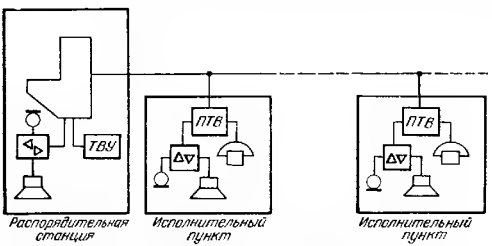


Рис. 4.14. Схема организации диспетчерской избирательной связи:
*ТВУ* тональное вызывное устройство; *ПТВ* приемник тонального вызова

соответствующей комбинации тональных частот. Эта комбинация частот фиксируется только одним пунктом.

На практике часто оказывается неудобным, что абонент может вести переговоры по сети диспетчерской телефонной связи только с одним диспетчером. Механическое увеличение числа устанавли-

ваемых коммутаторов прямой телефонной связи и соединение их между собой прямыми линиями требуют больших капитальных затрат. Установление соединений абонентов диспетчерской связи между собой через коммутатор диспетчера превращает последнего в телефонистку, а также ограничивается возможностью оборудования, которое не предназначается для этих целей.

Наиболее рациональным решением данной проблемы является автоматизация диспетчерской телефонной связи, заключающаяся в том, что при сохранении всех преимуществ диспетчера абоненты этой сети соединяются между собой автоматически через специальную ПАТС малой емкости или оборудование выделенной емкости ПАТС промышленного предприятия. Таким образом, для соединения с диспетчером используются прямые линии, а для соединения абонентов между собой - коммутируемые. При этом абоненты пользуются одним и тем же телефонным аппаратом и одной и той же абонентской линией. Схема организации автоматизированной диспетчерской связи приведена на рис. 4.15. Из схемы видно, что вместо двух абонентских линий (к ПАТС и к диспетчерскому коммутатору) и двух телефоиных аппаратов в автоматизированной системе диспетчерской связи используются одна абонентская линия и один телефонный аппарат, но появляются дополнительные связи между ПАТС и диспетчерским коммутатором. Кроме того, усложняется и соответственно удорожается оборудование диспетчерского коммутатора. Однако стоимость абонентских линий и телефоиых аппаратов намного превосходит удорожание стоимости диспетчерского коммутатора. По схеме автоматизированной диспетчерской связи могут работать станции прямой связи типа СДС М-50/100, «Кристалл», «Псков».

На любом промышленном предприятии имеется несколько руководителей — директор, главный инженер, заместители директора и т. д., причем у каждого из них устанавливается коммутатор прямой телефонной связи. Следует иметь в виду, что круг абонентов у них в основном совпадает начальники отделов, руководители подчиненных подразделений и т. д. Вследствие этого на рабочих местах абонентов скапливается большое количество телефонных аппаратов, приходится параллельно прокладывать соответствующее количество абонентских линий.

Для того чтобы каждый абонент пользовался одним телефонным аппаратом и одной абонентской линией, но при этом сохранял возможность прямого телефонного разговора со своими руководителями или диспетчерами разработаны системы телефонной связи с двумя (УНС-20, «Псков-2») и тремя («Псков-3», ЭДТС-66) пультами. Схема организации такой связи приведена на рис. 4.16. При снятии абонентом УНС-20 и «Псков-2» микротелефонной трубки сигнал вызова фиксируется на одном из пультов, вследствие чего абонент может вызвать только одного (любого) из двух руководителей. Обычно связь организуется таким образом, чтобы вызовы поступали к директору. Если директор отсутствует, то простое пе-

реключение позволяет направить поступающие вызовы на пульт главного инженера.

Связь от обоих пультов к разным абонентам может осуществляться одновременно. Сигнализация на пультах показывает каждому руководителю, что с другого пульта ведется разговор с тем

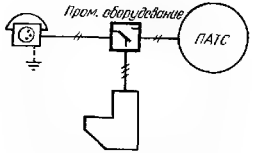



Рис. 4.15. Схема организации автоматизированной диспетчерской связи

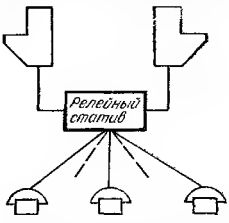



Рис. 4.16. Схема организации сети диспетчерской или директорской телефонной связи с двумя пультами

или иным абонентом. Разговор одновременно обоих руководителей с одним абонентом схемой установки не допускается.

При использовании установки «Псков-3» третий пульт устанавливается у секретаря, который выполняет функции телефонистки и делит поступившие вызовы между двумя руководителями.

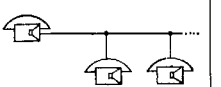
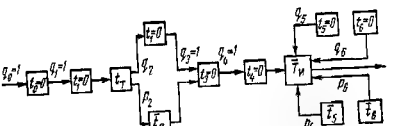
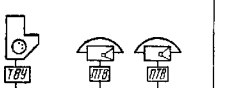
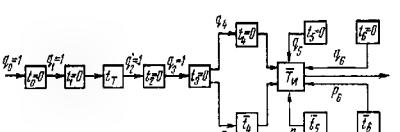
Установка ЭДТС-66 является диспетчерской и в основном используется в энергосетях. Разделение вызовов между отдельными пультами облегчено тем, что все диспетчеры, использующие указанные пульты, как правило, находятся в одном помещении. Кроме того, специфика работы системы диспетчерской связи такова, что вызовы в основном направлены от диспетчеров.

*Модель процесса доставки информации.* Модели процесса доставки информации при диспетчерской и директорской связи (входящей, исходящей и между пультами) были представлены в табл. 4.2, из которой следует, что максимально рассмотренные процессы могут находиться в 32 возможных состояниях. В табл. 4.4 сведены модели процессов доставки информации в сетях диспетчерского совещания, постанционной избирательной связи, автоматизированной диспетчерской связи, совмещенных директорской и диспетчерской связей, являющихся модификациями моделей табл. 4.2.

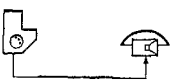
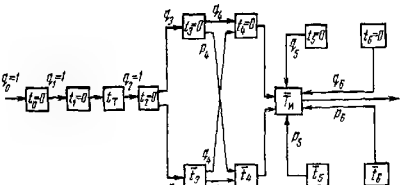
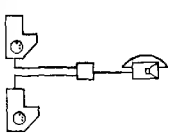
При проведении диспетчерского совещания по телефону время его заранее известно и абоненты не затрачивают время на подход и ожидание освобождения занятого другим разговором телефонного аппарата диспетчерской связи ($t_0=0$, $t_1=0$, $t_4=0$). Если данный абонент желает выступить перед участниками совещания, он

Таблица 4.4

НЕКОТОРЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ И ДИРЕКТОРСКОЙ СВЯЗИ И МОДЕЛИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ

| Направление связи | Схема организации связи | Модель процесса доставки информации | Число возможных состояний |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Диспетчерское совещание по телефону |  |  | 8 |
| Диспетчерская избирательная связь |  |  | 8 |

*Продолжение*

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Автоматизированная диспетчерская телефонная связь (от диспетчера к абоненту) |  |  | 16 |
| Совмещенная директорская и диспетчерская телефонная связь (от директора или главного инженера к абоненту) |  | | 16 |

(в наиболее распространенном случае) должен нажать кнопку на своем телефонном аппарате («Прошу слова»), и ведущий совещание ключом на диспетчерском коммутаторе подключит микрофонную цепь телефонного аппарата этого абонента к цепи связи совещания (через усилитель коммутатора). Время нажатия абонентом кнопки «Прошу слова» и время нажатия ведущим совещание ключа на своем коммутаторе в сумме представляют собой время, необходимое для выполнения технических операций по установлению соединения $t_т$. Однако ведущий совещание может не сразу предоставить слово данному абоненту, так как на его коммутаторе может загореться сразу несколько лампочек, сигнализирующих о том, что ряд абонентов просит слова, и ведущий вначале может дать слово другому участнику совещания. Кроме того, по соображениям самого различного характера, ведущий может задержать выступление какого-либо абонента на некоторое время, даже если других желающих получить слово (исключая, конечно, самого ведущего) в этот момент не имеется. Поэтому могут возникнуть затраты времени на ожидание в процессе собственно установления соединения $t_2$ — единственный возможный вид затрат в данном случае.

При использовании диспетчерской избирательной связи затраты времени складываются:

1) при связи от диспетчера — из затрат времени на подход вызываемого абонента ($t_4$) и увеличения продолжительности разговора вследствие недостаточного качества и надежности разговорного тракта ($t_5$ и $t_6$);

2) при связи к диспетчеру — из затрат времени на подход вызывающего абонента ($t_0$), ожидание в процессе установления соединения ($t_2$), ожидание ответа диспетчера ($t_4$), а также увеличения продолжительности разговора вследствие недостаточного качества и надежности разговорного тракта ($t_5$ и $t_6$).

В сети автоматизированной диспетчерской связи передача сообщения от абонента к диспетчеру осуществляется в соответствии с моделью, данной в табл. 4.2. Нет отличия и при передаче сообщений между двумя диспетчерскими коммутаторами.

При связи от диспетчера к абоненту в модели появляется новый элемент — непроизводительные затраты времени в связи с занятостью абонента ($t_3$). Эти затраты возникают вследствие того, что в сети автоматизированной диспетчерской связи абоненты устанавливают соединения друг с другом, минуя диспетчера, автоматически (через ПАТС) и в момент вызова абонента диспетчером тот может быть занят разговором с другим абонентом. Величина $t_3$ равна времени подключения диспетчера к занятому абоненту, опроса его на фоне сигнала занятости и сброса предшествующего соединения.

Аналогичную модель имеет и процесс доставки информации в совмещенных системах директорской и диспетчерской связи при связи от пульта к абоненту. Величина $t_3$ в последнем случае пред-

ставляет собой затраты времени из-за занятости вызываемого абонента разговором с другим руководителем или диспетчером.

Модель процесса доставки информации при соединении между собой двух абонентов автоматизированной диспетчерской связи совпадает с аналогичной моделью сети производственной автоматической телефонной связи, приведенной в табл. 4.2. Модель процесса доставки информации в системах директорской и диспетчерской связи с двумя пультами при связи от абонента аналогична модели связи к диспетчеру, приведенной в табл. 4.2. Отличие между двумя указанными моделями заключается в физическом смысле величины $t_3$: в модели, приведенной в табл. 4.2 — это время занятости диспетчера другим разговором; при системе с двумя пультами — это время занятости директора или главного инженера другим разговором.

Если абоненту необходимо соединиться с руководителем, на пульт которого не поступает сигнал вызова, то в модели должны быть дополнительно учтены затраты времени в процессе собственно установления соединения $t_2$, величина которых определяется из конкретных условий функционирования каждой сети. Например, она может оказаться равной бесконечности, когда информация главному инженеру (в присутствии директора) передается через сеть ПАТС.

*Алгоритм расчета эффективности функционирования.* Расчет эффективности функционирования сети директорской и диспетчерской связи базируется на алгоритме, изложенном в предыдущем разделе для сети производственной автоматической телефонной связи. Отличие состоит в количестве состояний, подлежащих перебору, а также в количестве параметров, фигурирующих в расчетных формулах. И количество возможных состояний, и количество параметров для сетей директорской и диспетчерской связи много меньше, чем для сети производственной автоматической телефонной связи. Это дает возможность рассчитывать эффективность функционирования сетей диспетчерской и директорской связи не только с помощью ЭВМ, но и вручную.

Рассмотрим сеть диспетчерской телефонной связи при соединении диспетчера с абонентом. Модель доставки информации в такой сети приведена в табл. 4.2. Фактор надежности из модели, как и ранее, исключен. Тогда данная сеть может находиться всего в четырех состояниях, определяемых затратами времени на подход вызываемого абонента к телефонному аппарату и величиной увеличения продолжительности разговора вследствие недостаточного качества разговорного тракта. Величины $t_0$, $t_1$, $t_2$, $t_3$ в модели приняты равными нулю, потому что диспетчерским коммутатором пользуется одно лицо, постоянно находящееся возле него, и никаких других соединений, кроме устанавливаемых диспетчером, в сети нет.

Примем, что любым телефонным аппаратом диспетчерской связи пользуется $m$ человек, каждый из которых создает поток вызо-

вов $\lambda = \lambda_{исх} + \lambda_{вх}$. Среднее расстояние абонента до телефонного аппарата равно $L$. Вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени в чин на подход к телефонному аппарату согласно (3.54′) будет равна

$$q_4 = m\lambda_{вх}T\left(\frac{t_{i=0}}{T^2} + \tau\lambda T_{и} + \tau_{исх}\lambda_{исх}T_{п}\right) + \frac{m\lambda_{исх}\lambda_{вх}L^2}{v^2}\, e^{-\frac{\lambda_{вх}L}{v}}.$$

Принимая $\lambda_{исх} = \lambda_{вх} = \lambda/2$ и $\tau_{исх} = 0$, окончательно получим

$$q_4 = \frac{\lambda mT}{2}\left(\frac{t_{i=0}}{T^2} + \tau\lambda T_{и}\right) + \frac{L^2 m\lambda^2}{4v^2}\, e^{-\frac{\lambda L}{2v}}. \qquad (4.2)$$

Время, затрачиваемое на подход к телефонному аппарату на входящем конце, отнесенное к одному вызову, для простоты примем равным

$$t_4 = \frac{2L}{v} m. \qquad (4.3)$$

Математическое ожидание непроизводительных затрат времени из-за недостаточного качества разговорного тракта в соответствии с (3.67) равно

$$t_5 = \left[\frac{1}{J(1 - 21{,}83\lg J)} - 1\right]T_{и}. \qquad (4.4)$$

Вероятность того, что непроизводительных затрат времени вследствие недостаточного качества разговорного тракта не будет, на основе (3.66) может быть принята равной

$$q_5 = (1 - t_{40}), \qquad (4.5)$$

так как в сетях диспетчерской связи, как правило, $N_{13}/N_{общ} = 1$, а в помещении диспетчерского пункта $t_{40} = 0$.

Таким образом, имеются все необходимые расчетные формулы ($q_4$, $q_5$, $t_4$, $t_5$), поскольку $p_4 = 1 - q_4$ и $p_5 = 1 - q_5$. Считая, что скорость перемещения абонента может быть принята постоянной ($v = 1{,}1$ м/с), имеем 8 параметров, входящих в указанные формулы: $m$, $\lambda$, $T_{и}$, $\tau$, $L$, $J$, $t_{40}$, $t_{i=0}$.

Порядок проведения вычислений величины эффективности функционирования сети в данном случае должен быть следующим.

1. Фиксируются исходные данные.
2. Рассчитываются величины $q_4$ и $q_5$, $t_4$ и $t_5$.
3. Подсчитываются вероятности состояний:

$$P_1 = q_4 q_5; \quad P_2 = q_4(1 - q_5); \quad P_3 = (1 - q_4)q_5; \quad P_4 = (1 - q_4)(1 - q_5).$$

4. Определяются непроизводительные затраты времени:

$$T_1 = t_{т}; \quad T_2 = t_5 + t_{т}; \quad T_3 = t_4 + t_{т}; \quad T_4 = t_4 + t_5 + t_{т}.$$

5. Рассчитывается величина эффективности функционирования по ф-ле (3.12).

Алгоритмы расчета эффективности функционирования других схем организации диспетчерской и директорской связи могут быть составлены аналогично.

*Численные результаты.* В соответствии с приведенным выше алгоритмом необходимо вычислить эффективность функционирования сети по четырем ее состояниям, варьируя 8 параметрами.

При расчете эффективности функционирования сети ПАТС была достаточно подробно рассмотрена зависимость величин $E$ и $Q$ от числа абонентов, пользующихся одним телефонным аппаратом, а также параметров телефонной нагрузки $\lambda$ и $T_и$. Нет никаких оснований предполагать, что характер этих зависимостей не будет сохранен и в данном случае. Примем $m=1$. Допустим также, что абонент находится от телефонного аппарата в среднем на расстоянии $L=1$, 5, 10 и 15 м, причем в месте установки телефонного аппарата у него рабочего места нет (т. е. $t_{i-0}-0$). После окончания каждого разговора абонент немедленно возвращается на свое рабочее место (т. е. $\tau=0$). Указанные условия соответствуют размещению телефонного аппарата диспетчерской связи в производственных цехах с достаточно высокой степенью автоматизации и механизации технологических процессов.

Определим зависимость эффективности функционирования сети от расстояния абонента до телефона $L$. Для этого зафиксируем остальные исходные данные, например, примем $T_и=120$ с; $J=1$; $t_{40}=0$; $t_т=2$ с. Полученные результаты представим в виде графика (рис. 4.17), из которого следует, что эффективность функционирования сети диспетчерской и директорской связи весьма велика, но с увеличением $L$ она уменьшается. Для того чтобы определить зависимость эффективности функционирования от величины фразовой разборчивости $J$ и времени, в течение которого в месте установки телефонного аппарата уровень шума превышает 40 дБ ($t_{40}$), примем, что $T_и=120$ с, $L-0$, $t_т-2$ с. Графики полученных таким образом зависимостей представлены на рис. 4.18. Из рисунка следует, что эффективность функционирования сетей диспетчерской и директорской связи зависит от характеристик качества разговорного тракта. Зависимость величины $E$ от величины $t_{40}$ близка к линейной.

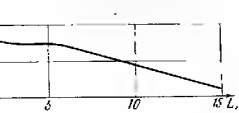


Рис. 4.17. Зависимость величины $E$ от расстояния $L$

Несмотря на простоту математической модели сетей прямой телефонной связи, объем вычислений оказывается значительным, когда требуется перебрать все возможные значения рассматриваемых параметров друг с другом. Однако в практических условиях не нужно проводить полный перебор всех параметров, ограничиваясь небольшим количеством вариантов, число которых определяется исходя из конкретных условий той или иной сети.

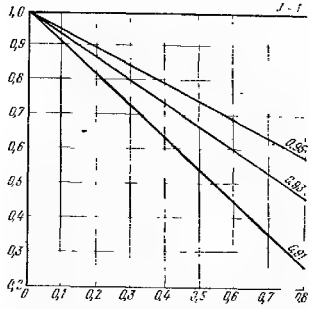



Рис. 4.18. Зависимость величины $E$ от относительной продолжительности времени $t_{40}$, в течение которого уровень шума в месте приема больше уровня 40 дБ

*Оптимизация сети.* Оптимизация сети диспетчерской и директорской связи производится аналогично оптимизации сети производственной автоматической телефонной связи, исходя из заданной величины эффективности функционирования. Величина поступающей в сеть телефонной нагрузки в каждом случае предполагается известной. Поэтому при расчете определяется емкость коммутатора диспетчерской и директорской связи или устанавливается круг включаемых в этот коммутатор абонентов, при которых будет обеспечена заданная величина эффективности функционирования или оперативности связи.

Подчеркнем еще раз, что данные расчеты никаким образом не связаны с экономическими показателями и могут выполняться в тех случаях, когда эти показатели допускается принять постоянными для всех вариантов или по каким-либо причинам они являются несущественными.

Емкость коммутатора диспетчерской и директорской связи (или число абонентов данного коммутатора) может быть определена по величине $m$ или расстоянию $L$, соответствующим предельно допустимым значениям эффективности функционирования или оперативности связи при заданных прочих условиях функционирования сети. Для определения $m$ и $L$ могут использоваться графики, аналогичные приведенным на рис. 4.6 и 4.17.

## 4.4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ АБОНЕНТАМИ

*Назначение.* Автоматизированные системы связи с подвижными абонентами предназначены для комплексного использования проводных и радиосредств с целью предоставления возможности абонентам радиосетей соединяться не только друг с другом, но и с абонентами производственной автоматической и диспетчерской телефонной связи, а последним – с абонентами радиосетей.

На любом промышленном предприятии имеется определенная группа абонентов системы производственной связи, которая постоянно или периодически находится в движении (железнодорож-

ный и автомобильный транспорт, горные, строительные, дорожные машины и механизмы и т. д.). Есть абоненты, которые удалены от устройств связи промышленного предприятия, но нуждаются в подключении к данным устройствам (насосные водозаборных и очистных сооружений, карьеры, отвалы, шламоотстойники, объекты строительства специализированных и общестроительных трестов и т. д.). Во всех этих случаях организация проводной связи либо невозможна, либо экономически нецелесообразна. Поэтому организуется связь с применением радиосредств. Если радиосредства используются изолированно, в очень слабом взаимодействии или полном отрыве от других сетей производственной связи, то организуемые таким способом сети служат, как правило, только для целей диспетчерского управления и называются прямой радиосвязью (см. разд. 4.5).

Многие годы прямая радиосвязь была практически единственным средством связи с подвижными и передвижными объектами. Однако значительное увеличение числа таких объектов на промышленных предприятиях и в строительстве потребовало организации большого количества разрозненных радиосетей. Объединение последних в единую систему позволяет улучшить технические, экономические и эксплуатационные характеристики радиосвязи.

*Схема организации связи.* Имеются два пути организации систем радиосвязи с подвижными абонентами:

1) с использованием симплексных или дуплексных радиостанций сети прямой радиосвязи, дополняемых соответствующими приставками (с номеронабирателями), и включением в состав ПАТС переходных устройств (или организации специально оборудованного радиоцентра [7, 151];

2) с применением специального комплекта оборудования центральной станции и абонентских пунктов.

Первый путь широко используется на крупных металлургических комбинатах, а также в строительных организациях, второй — в различных объединениях.

В обоих случаях обеспечиваются следующие преимущества перед прямой радиотелефонной связью:

— объединение локальных радиосетей в единую систему, имеющую общие коммутационные устройства, позволяет абонентам различных радиосетей обмениваться информацией непосредственно друг с другом;

— использование комплекса проводных и радиосредств позволяет абонентам на подвижных объектах соединяться не только друг с другом, но и с абонентами телефонной сети (возможна связь и в обратном направлении);

сохраняется возможность проведения циркулярных переговоров диспетчера со «своими» абонентами; абоненты упрощенным способом соединяются со «своими» диспетчерами;

— сокращается требуемое количество радиочастот;

— улучшается качество радиосвязи.

Недостатками обоих способов организации связи являются следующие, присущие любой современной системе коммутируемой связи:

— возможность получения сигнала «занято», если все каналы заняты разговорами;

- невозможность установления абонентом момента освобождения канала;

- отсутствие возможности перебить ведущийся разговор в экстренных случаях.

На рис. 4.19 показана схема связи с подвижными объектами на базе аппаратуры типа «Алтай», которая выпускается отечественной промышленностью и широко применяется для органи-

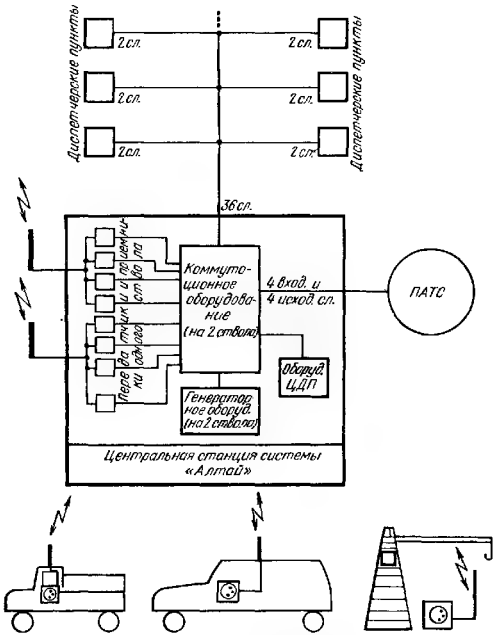



Рис. 4.19. Схема связи с подвижными объектами на базе аппаратуры типа «Алтай»

зации связи городских хозяйств, крупных строительных объединений и промышленных комбинатов.

Система «Алтай» может содержать в своем составе оборудование центральной станции на 1, 2 или более стволов, каждый из которых обслуживает автономную группу абонентов, имеющих выход на 8 равнодоступных радиоканалов, используемых при любой входящей и исходящей связи с абонентскими пунктами. В каждом стволе центральной станции обеспечены:

выход подвижного абонента на связь с соответствующим диспетчерским пунктом и с центральным диспетчерским пунктом при автоматическом установлении соединения путем набора двузначного номера (центральный диспетчер вызывается набором цифр «0»);

— выход части подвижных абонентов (не более 100) на связь с любым абонентом городской или производственной телефонной сети при автоматическом установлении соединения путем набора цифры «8» и после получения второго зуммера набора полного номера абонента телефонной сети;

выход диспетчера и центрального диспетчера на связь с подвижным абонентом набором трехзначного номера этого абонента или на группу абонентов — циркулярно, набором трехзначного номера соответствующего циркулярного вызова;

выход любого абонента городской или производственной телефонной сети на связь с подвижными абонентами, имеющими право внешней связи при автоматическом установлении соединения путем набора номера, закрепленного за этим абонентом;

— связь двух подвижных абонентов между собой при автоматическом установлении соединения путем набора однозначного индекса выхода «6» и трехзначного номера вызываемого абонента;

связь между подвижным абонентом и абонентами телефонной сети, а также подвижных абонентов между собой с использованием диспетчерского пункта или центрального диспетчерского пункта в качестве промежуточного звена при установлении соединения;

— связь между центральным диспетчерским пунктом и диспетчерским пунктом при автоматическом установлении соединения путем набора трехзначного номера центрального диспетчера или двузначного номера диспетчера;

телеграфный обмен между абонентским и диспетчерским пунктами (при использовании специальных приставок).

Для обеспечения некоторым абонентам возможности непосредственного выхода на телефонную сеть при автоматическом установлении соединения каждый ствол центральной станции имеет входящие и исходящие соединительные линии с ПАТС (до четырех входящих и четырех исходящих). Входящие соединительные линии включаются в ПАТС на правах выносной АТС, а исходящие — на правах абонентов. При этом для каждого ствола на ПАТС занимается одна сотенная группа и за каждым абонентом, имеющим

право непосредственного выхода на ПАТС, закрепляется индивидуальный абонентский номер ПАТС.

Как следует из рис. 4.19, в каждый ствол системы «Алтай» может включаться несколько (не более 18) диспетчерских пунктов. На центральной станции системы развертывается центральный диспетчерский пункт. При использовании системы «Алтай» в качестве общегородской диспетчерские пункты размещаются у диспетчеров различных ведомств (такси, скорая помощь, ремонтные службы водопровода, газа и т. д.). Отсюда их название — ведомственные диспетчерские пункты (ВДП). Если система используется строительным объединением, то в центральном диспетчерском пункте этого объединения устанавливается одноименное оборудование, входящее в состав центральной станции системы «Алтай», а в главных диспетчерских пунктах строительных трестов размещаются ВДП

Каждый диспетчерский пункт может иметь 2, 4 или 6 соединительных линий с центральной станцией, по которым он может одновременно вести разговоры с подвижными абонентами, соединить их между собой. Кроме того, 10 диспетчерских пунктов в каждом стволе могут организовать циркулярные совещания с соответствующей группой абонентов, «закрепленных» за каждым из указанных диспетчерских пуиктов. Для организации таких совещаний выделены соответствующие комбинации частот, с помощью которых производится циркулярный вызов. При поступлении циркулярного вызова все абонентские пункты, для которых он предназначен, подключаются к тому каналу, по которому прошел вызов.

Вызов требуемого абонента осуществляется избирательно, с помощью посылки комбинации трех частот из 30. Первая частота соответствует сотням, вторая — десяткам, а третья — единицам цифры трехзначного номера абонента. Сигналы избирательного вызова попадают на вход приемников всех абонентских пунктов ствола, но фиксируются только тем пунктом, за которым закреплен данный избирательный вызов. Автоматически включается передатчик радиостанции и посылает в сторону центральной станции сигнал подтверждения приема своего избирательного вызова. По этому сигналу автоматически закрепляется соединение и в сторону абонентского пункта посылается акустический сигнал вызова, воспроизводимый динамическим громкоговорителем. Если все каналы заняты или вызываемый абонент занят, вызывающий получит сигнал «занято».

Перечисленные выше возможности обеспечиваются входящим в состав системы «Алтай» оборудованием центральной станции, а также диспетчерских и абонентских пунктов. В свою очередь, центральная станция состоит: из стоек приемников и передатчиков, образующих 8 дуплексных радиоканалов; генераторного и коммутационного оборудования, которые используются 2 стволами, а также центрального диспетчерского пункта. Коммутационное оборудование предназначено для подключения соединительных линий

к АТС (4 исходящих и 4 входящих) и диспетчерским пунктам. Диспетчерский пункт может быть удален от центральной станции на такое расстояние, при котором затухание кабельной линии не превышает 4,35 дБ, а сопротивление шлейфа не более 1000 Ом. На некоторое расстояние от центральной станции может быть вынесено генераторное и коммутационное оборудование.

Из вышеизложенного следует, что система «Алтай» представляет собой комплекс устройств, позволяющих использовать комбинированно проводные и радиосредства, производственную автоматическую и диспетчерскую телефонную связь.

*Модель процесса доставки информации.* На основе схем организации связи по отдельным направлениям составляются соответствующие модели процесса доставки информации. В табл. 4.2 была приведена модель процесса доставки информации при схеме связи от подвижного абонента к абоненту ПАТС. В табл. 4.5 даются модели по другим направлениям связи, причем, как и раньше, предполагается, что на абонентском пункте системы «Алтай» так же, как и на любом диспетчерском пункте, постоянно присутствует одно лицо, вследствие чего при исходящей связи от этих пунктов $q_0 - q_4 = 1$, $t_0 = t_4 = 0$, а при входящей связи к ним $q_4 = 1$ и $t_4 = 0$.

В практических условиях может быть такое положение, когда оконечным устройством системы «Алтай» пользуется несколько человек, что способствует возникновению очередей ($t_1 > 0$) и появлению затрат времени на подход ($t_0 > 0$; $t_4 > 0$). Тогда модели, приведенные в табл. 4.5, должны быть пересмотрены (добавлены соответствующие элементы модели и увеличено число возможных состояний).

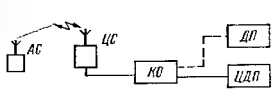
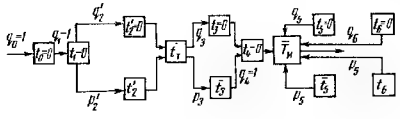
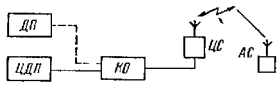
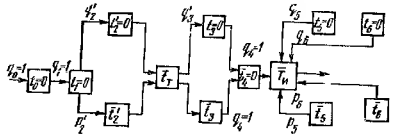
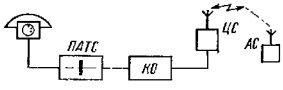
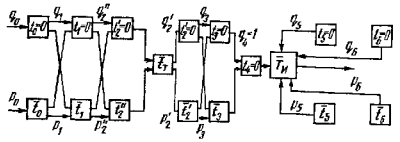
В табл. 4.5 одним штрихом отмечены вероятности и затраты времени в процессе собственно установления соединения на участке между центральной станцией и абонентским пунктом системы «Алтай» (радиотракт); двумя штрихами — на ПАТС и тремя штрихами — между диспетчерскими пунктами. Как видно, при принятых допущениях на самых протяженных направлениях связи (между подвижными абонентами и АТС) число возможных состояний сети равно 128, как и в сети производственной автоматической телефонной связи при связи двух абонентов между собой. Это важно подчеркнуть потому, что в данном случае элемент модели с индексом 2 (ожидания в процессе собственно установления соединения) подразделен на 3 подэлемента, самостоятельно введенных в общую модель.

Если не вводить никаких ограничений на число лиц, которое может пользоваться одним оконечным устройством системы «Алтай», то при связи подвижного абонента с абонентом ПАТС число состояний сети достигает 512 при ручном способе установления соединения и 256 при автоматическом.

*Алгоритм расчета эффективности функционирования, численные результаты и оптимизация сети.* Алгоритм расчета эффективности функционирования системы «Алтай» отличается от алгорит-

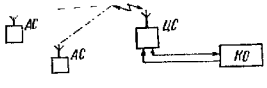
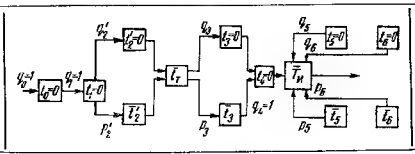
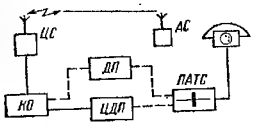
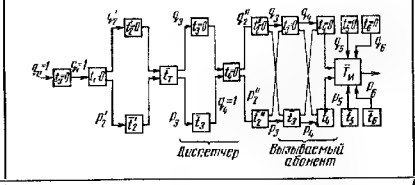
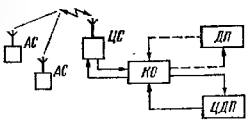
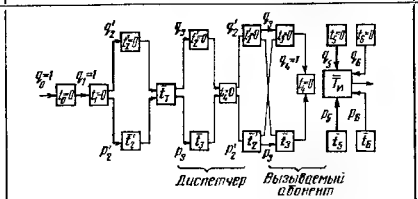
Таблица 4.5

ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАДИОСВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ «АЛТАЙ» И МОДЕЛИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ

| Направление связи | Схема организации связи | Модель процесса доставки информации | Число возможных состояний |
|---|---|---|---|
| Подвижный абонент — диспетчерский пункт или центральный диспетчерский пункт |  |  | 16 |
| Диспетчерский пункт или центральный диспетчерский пункт — подвижный абонент |  |  | 16 |
| Абонент АТС — подвижный абонент |  |  | 128 |



*Продолжение*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Подвижный абонент — подвижный абонент |  |  | 16 |
| Подвижный абонент — диспетчерский пункт (или центральный диспетчерский пункт) абонент АТС (ручное обслуживание) |  |  | 128 |
| Подвижный абонент — диспетчерский пункт (или центральный диспетчерский пункт) — подвижный абонент (ручное обслуживание) |  |  | 64 |

*Продолжение*

| Направление связи | Схема организации связи | Модель процесса доставки информации | Число возможных состояний |
|---|---|---|---|
| Центральный диспетчерский пункт—диспетчерский пункт | ЦДП — КО — ДП |  | 8 |

Примечание. ЦС — центральная станция «Алтай»; КО — коммутационное оборудование системы «Алтай»; ЦДП. ДП — центральный диспетчерский пункт, диспетчерский пункт; АС — абонентская станция

ма такого же расчета сети производственной автоматической телефонной связи наличием 3 элементов, характеризующих ожидание в процессе собственно установления соединения — в радиотракте системы «Алтай», на ПАТС и между диспетчерскими пунктами. Все необходимые расчетные формулы были приведены в разд. 2.1 и гл. 3. По ним несложно высчитать все количественные характеристики элементов и осуществить требуемый перебор для любой модели, приведенной в табл. 4.5. Поэтому, во избежание повторений, алгоритм расчета здесь не приводится.

Из всех разновидностей моделей системы «Алтай» наихудшей эффективностью обладает модель доставки информации по направлению «подвижный абонент — абонент ПАТС», так как тракт соединения в данном случае наиболее протяженный. Если на этом направлении будет обеспечена требуемая величина эффективности функционирования или оперативности связи, то тем более она будет достигнута при связях по другим направлениям.

Применительно к модели доставки информации от подвижного абонента к абоненту ПАТС при условии, что вся поступающая от подвижных абонентов нагрузка направляется только на ПАТС, была разработана программа расчета на ЭВМ «Наири». Исходными данными в этой программе является величина нагрузки, создаваемой абонентами системы «Алтай» и ПАТС, а также величины, характеризующие затраты времени абонентов ПАТС, на подход к телефонному аппарату при поступлении вызова

от абонента системы «Алтай». В качестве констант фигурируют число радиоканалов системы (восемь), число соединительных линий между центральной станцией и ПАТС (четыре) и др.

По указанной программе были произведены расчеты эффективности функционирования и оперативности связи системы «Алтай» (при характеристиках телефонной сети: интенсивность потока вызовов абонента ПАТС в чнн $\lambda_2$ 2,5 выз./ч; $q_1=0{,}25$; $t_1=0{,}0028$ ч и $t_4=0{,}0056$ ч). Результаты расчетов показаны на рис. 4.20—4.25. При других характеристиках сети необходимо проводить соответствующие расчеты на ЭВМ.

Графики на рис. 4.20 4.25 позволяют установить некоторые характерные зависимости. Из графика функции $E=\Phi(v)$ на рис. 4.20 следует, что эффективность функционирования системы

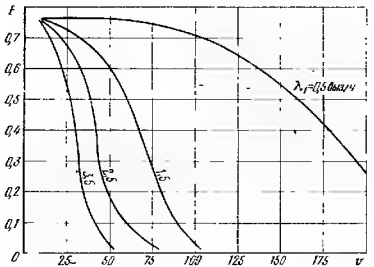



Рис. 4.20. Зависимость величины $E$ системы «Алтай» от числа абонентских пунктов $v$ при разных значениях величины интенсивности потока $\lambda_1$

монотонно убывает с увеличением числа абонентских пунктов $v$, причем убывание тем резче, чем больше интенсивность потока вызовов $\lambda_1$, создаваемого одним абонентским пунктом системы «Алтай» в чнн.

По приведенным кривым можно при заданной величине нагрузки $y=\lambda_1 T_{\text{п}}$, исходя из требуемого уровня эффективности функционирования, однозначно определить максимально допустимое количество абонентских пунктов в стволе системы. Если необходимо обеспечить заданную величину оперативности связи $Q$, то для решения этой задачи должны использоваться кривые, приведенные на рис. 4.21, или аналогичные им, построенные при других нагрузках. Из рисунка следует, что увеличение количества вызовов влияет на уменьшение величины оперативности связи значительно больше, чем увеличение среднего времени переговора. Величина оперативности связи $Q$ чувствительна к параметрам, характеризующим

телефонную сеть, в частности, к количеству абонентов $m$, пользующихся одним телефонным аппаратом. Однако с увеличением числа абонентских пунктов влияние этих параметров уменьшается, при-

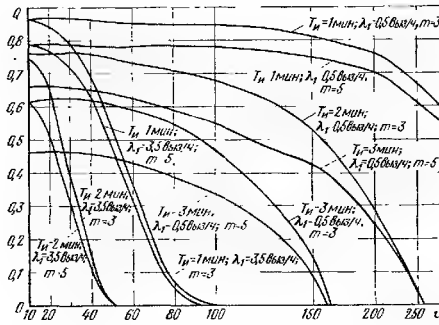



Рис. 4.21. Зависимость оперативности связи системы «Алтай» от числа абонентских пунктов при разных значениях величин $T_и$ и $\lambda_1$

чем тем резче, чем больше нагрузка, создаваемая абонентскими пунктами.

Эффективность функционирования весьма резко уменьшается с возрастанием интенсивности потока вызовов, поступающего от одного абонентского пункта в чин (рис. 4.22). Существенное значение при этом имеет средняя продолжительность одного разговора $T_и$, мин. При одних и тех же значениях $\lambda_1$ эффективность функционирования может оказаться меньше при меньших величинах $T_и$. Последнее свидетельствует о наличии максимума функции эффективности функционирования от продолжительности разговора, который наглядно виден на рис. 4.23. С увеличением числа вызовов в чин максимум сдвигается влево и уменьшается по амплитуде. Однако при больших значениях $\lambda_1$ эти изменения экстремума становятся все менее и менее заметными.

Максимум функции $E-f(T_и)$ указывает на существование оптимальных условий обеспечения передачи информации. Если в реальной сети величина нагрузки не позволяет получить максимума эффективности функционирования, то будет иметь место либо недоиспользование возможностей сети (при $T_и<T_{опт}$), либо ее перегрузка (при $T_и>T_{опт}$). Недоиспользование возможностей сети означает, что при ее проектировании был допущен перерасход средств, которые в систему вложены, но по назначению не используются.

Если время разговора больше $T_{опт}$, то заметно возрастает величина нагрузки в сети и увеличивается время ожидания из-за занятости соединительных путей. Сокращение времени разговора является наиболее радикальным путем возвращения сети ее оптимальных свойств. Если этого сделать невозможно, то сеть должна быть перестроена таким образом, чтобы максимум эффективности функ-

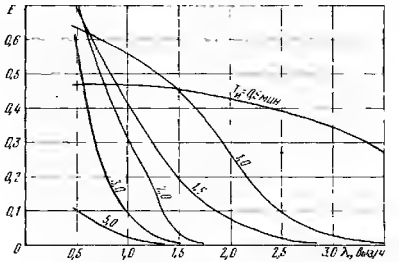



Рис. 4.22. Зависимость величины $E$ системы «Алтай» от интенсивности потока вызовов $\lambda_1$ при разных значениях величины $T_к$

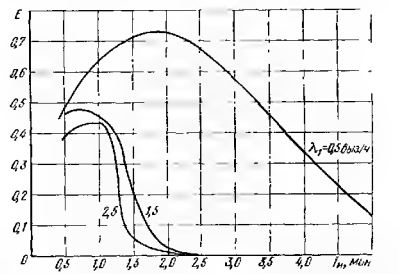



Рис. 4.23. Зависимость величины $E$ системы «Алтай» от продолжительности разговора при разных значениях величины $\lambda_1$

ционирования имел место при бо́льших значениях $T_к$, т. е. чтобы кривая передвинулась вправо. Последнего можно добиться, увеличивая число абонентских пунктов в сети. Однако, как было показано выше, увеличиять число абонентских пунктов в сети бес-

предельно нельзя. Поэтому в системе «Алтай» существует вполне четкий предел расширения емкости ствола при заданных параметрах нагрузки. При переходе за этот предел показатели сети резко ухудшаются и при некоторых условиях сеть полностью парализуется. Выйти из такого положения возможно только используя новую аппаратуру, отличающуюся от системы «Алтай» бо́льшим количеством радиоканалов и соединительных линий с АТС.

Программа расчета эффективности функционирования системы «Алтай» может быть использована для определения оптимального количества радиоканалов и числа соединительных линий с АТС.

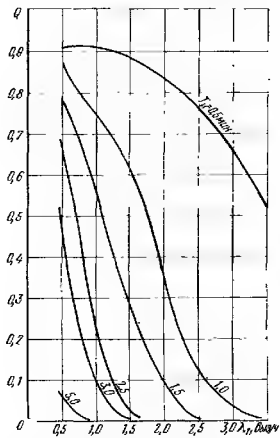



Рис 4.24. Зависимость оперативности связи системы «Алтай» от интенсивности потока при разных значениях величины продолжительности разговора $T_и$

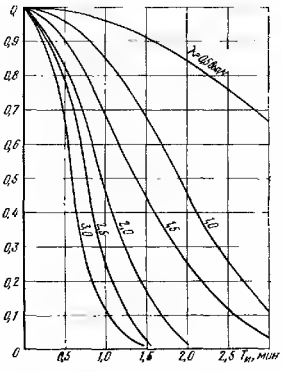



Рис. 4.25. Зависимость оперативности связи системы «Алтай» от продолжительности разговора при разных значениях величины интенсивности потока $\lambda_1$

Поскольку алгоритм построен на рекуррентных формулах, то, полагая число радиоканалов равным 9, 10... и число соединительных линий 5, 6..., можно установить указанные оптимумы, соответствующие данной величине нагрузки.

Зависимости оперативности связи $Q$ от интенсивности потока вызовов $\lambda_1$ (рис. 4.24) и продолжительности разговора $T_и$ (рис. 4.25) экстремумов не имеют.

Отметим, что все приведенные выше графики (рис. 4.20 –4.25) даны при числе абонентских пунктов в стволе $v=100$. При других

значениях $v$ характер кривых не изменяется, они только сдвигаются либо вниз и влево (при $v>100$), либо вверх и вправо (при $v<100$).

Как и везде выше, оперативность связи $Q$ определялась при наиболее жестком критерии оперативности $T_Q=t_т$, т. е. $Q=\prod^{n'} q_i$,

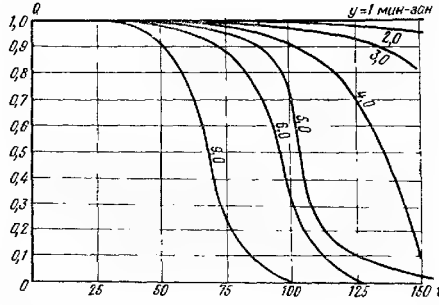



Рис. 4.26. Зависимость оперативности связи системы «Алтай» при связи абонентских пунктов между собой от числа абонентских пунктов при разных значениях величины нагрузки

где $n'$ — число элементов рассматриваемой модели (без $T_и$ и $t_т$).

Мы рассмотрели эффективность функционирования системы «Алтай» при связи абонентского пункта этой системы с абонентом ПАТС. В том случае, когда необходимо знать оперативность связи и время ожидания при связи абонентских пунктов системы «Алтай» друг с другом, можно пользоваться данными рис. 4.26 и 4.27, полученным в результате расчетов на ЭВМ «Минск-22М» по алгоритму, аналогичному выше описанному. Из рис. 4.26 и 4.27 следует, что и оперативность, и время ожидания резко изменяются даже при незначительном увеличении нагрузки, создаваемой одним абонентским пунктом в чнн и определяемой как $y=\lambda_1 T_и$.

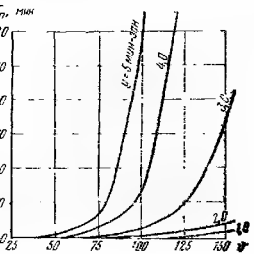



Рис. 4.27. Зависимость времени ожидания в системе «Алтай» при связи абонентских пунктов между собой от числа абонентских пунктов при разных значениях величины нагрузки

## 4.5. ДИСПЕТЧЕРСКАЯ РАДИОТЕЛЕФОННАЯ СВЯЗЬ

*Назначение.* Диспетчерская (прямая) радиотелефонная связь предназначена для организации связи диспетчерского пункта с подвижными абонентскими пунктами. В отличие от автоматизированной системы связи с подвижными абонентскими пунктами, в данном случае абонент может установить соединение и разговаривать только с диспетчером и с ограниченным числом других абонентских пунктов, имеющими ту же рабочую частоту.

Прямая радиотелефонная связь широко применяется для связи диспетчера на железнодорожном транспорте — с машинистами движущихся локомотивов, в гражданской авиации — с экипажами самолетов, в речном судоходстве — с судами, в строительстве — с бригадами на удаленных объектах, машинистами на строительных машинах и механизмах, в горнорудной промышленности — с экскаваторщиками на карьере и т. д.

*Схема организации связи.* Прямая радиотелефонная связь организуется путем установки в диспетчерском пункте центральной станции, а в абонентских пунктах — радиостанций, настроенных на одну рабочую частоту. В некоторых типах радиостанций требуемый абонент вызывается голосом. Каждый абонент должен постоянно прослушивать все ведущиеся на рабочей частоте переговоры, даже если они происходят между другими абонентскими пунктами и к данному абоненту отношения не имеют. В других типах радиостанций приемник постоянно находится в дежурном режиме (накалы ламп включены, аноды выключены) и вызов требуемой радиостанции осуществляется с помощью посылки вызывной частоты (групповой, если выбирается сразу несколько абонентских пунктов, или избирательный, если выбирается индивидуальный абонентский пункт). Услышав зуммер, возвещающий о поступлении вызывной частоты, абонент снимает микротелефонную трубку с рычажного переключателя радиостанции, переводя ее этим из дежурного режима в рабочий, и вступает в разговор с диспетчером. По этому принципу работают, например, радиостанции типа ЖР, предназначенные для связи с машинистами локомотивов.

Сетям прямой радиотелефонной связи присущи следующие недостатки:

1) в крупных городах имеется большое количество потребителей радиосвязи, а так как общее количество частот, отведенное для удовлетворения потребностей народного хозяйства, ограничено, то в настоящее время стала остро ощущаться нехватка частот для вновь открываемых радиосетей;

2) большое количество одновременно работающих радиосетей является причиной значительных взаимных помех, вследствие чего качество радиосвязи с увеличением числа радиосетей ухудшается;

3) радиостанции в большинстве случаев симплексные, пользование ими требует определенного навыка и имеет ряд неудобств.

Так как диспетчерский и все абонентские пункты работают на

одной частоте, то достоинствами прямой радиотелефонной связи являются:

1) возможность быстрой передачи циркуляра и проведения совещаний;

2) постоянный контроль за состоянием радиоканала;

3) возможность прерывания ведущегося по сети разговора в экстренных случаях.

При организации радиосетей стремятся к тому, чтобы в каждую сеть были включены тяготеющие друг к другу абоненты. Например, радиосеть диспетчера строительного управления должна обеспечивать ему возможность связаться с объектами строительства и т. д. Если количество радиостанций, которое необходимо включить в одну сеть, не обеспечивает требуемого качества связи, то из этих радиостанций формируются две или более радиосетей. Радиосети делятся либо по частоте, либо по времени. При разделении по частоте у тех абонентов, которые должны иметь связь с абонентами, работающими через радиостанции, включенные в разные сети, должно размещаться соответствующее количество радиостанций. При разделении по времени устанавливается расписание для вхождения в связь каждой радиостанции.

*Модель процесса доставки информации.* Процесс соединения двух абонентов состоит из следующих операций: снятия микротелефонной трубки с корпуса радиостанции, нажатия тангенты, вызова требуемого абонента голосом с использованием позывных вызываемой и своей станции (двукратное повторение), отжатия тангенты, манипуляции на вызываемой станции для ответа.

Непроизводительные затраты времени в сетях некоммутируемой радиотелефонной связи возникают за счет того, что одним каналом пользуется большая группа абонентов. Поэтому в ряде случаев возможна такая ситуация, когда во время ведущегося разговора один или несколько абонентов ожидают освобождения радиоканала для начала передачи. Оценка подобной ситуации производится с помощью аппарата теории массового обслуживания (см. разд. 2.1).

Вероятность наличия ожидающих освобождения радиоканала зависит от числа радиостанций в сети и величины нагрузки, создаваемой ими. При малом количестве радиостанций, включенных в каждую радиосеть и создающих небольшую нагрузку, будет недоиспользование радиочастот, дефицитность которых была отмечена выше. Наоборот, при перегрузке радиосети возрастает время ожидания, что затрудняет пользование радиосвязью. Поэтому надо стремиться к такой загрузке радиосети, которая позволила бы эффективно использовать выделенную радиочастоту при допустимом времени ожидания.

В табл. 4.2 была приведена модель процесса доставки информации в сети прямой радиотелефонной связи, которая с достаточной степенью точности может быть использована для представления указанного процесса при связи диспетчера с подвижным або-

ентом, подвижного абонента с диспетчером и подвижных абонентов между собой, т. е. практически во всех возможных ситуациях. В соответствии с этой моделью сеть может находиться в 8 состояниях, а если принять, что качество и надежность тракта идеальны, то всего в двух состояниях.

*Алгоритм расчета эффективности функционирования.* Примем, что качество и надежность разговорного тракта идеальны. Тогда в соответствии с определением эффективности функционирования и моделью сети прямой радиотелефонной связи эффективность функционирования

$$E = q_2 + (1 - q_2)\frac{T_и}{T_и + T_п}, \tag{4.6}$$

а оперативность связи

$$Q = q_2. \tag{4.7}$$

Вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени в процессе установления соединения $q_2$ удобно рассматривать как сумму двух вероятностей: $q_2 = q_{20} + q_{21}$, где $q_{20}$ — вероятность того, что радиоканал свободен и ожидающих не имеется; $q_{21}$ — вероятность того, что радиоканал занят, но ожидающих не имеется. Рассматриваются три возможных состояния сети: 1) радиоканал свободен; 2) радиоканал занят, но ожидающих не имеется; 3) радиоканал занят и имеются ожидающие. Непроизводительные затраты времени на ожидание освобождения радиоканала будут только при наличии ожидающих. Вероятность этих затрат $p_2 = 1 - q_2 = 1 - q_{20} - q_{21}$.

Очевидно, эффективность функционирования сети

$$E = q_{20} + q_{21} + (1 - q_{20} - q_{21})\frac{T_и}{T_и + T_п}; \tag{4.6'}$$

$$Q = q_{20} q_{21}. \tag{4.7'}$$

Здесь

$$q_{20} = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!}(\lambda T_и)^k}; \tag{4.8}$$

$$q_{21} = \frac{v \lambda T_и}{\sum\limits_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!}(\lambda T_и)^k}; \tag{4.9}$$

$$T_п = \frac{\sum\limits_{k=2}^{v} \frac{(k-1)\, v!}{(v-k)!}(\lambda T_и)^k}{\sum\limits_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!}(\lambda T_и)^k}. \tag{4.10}$$

В ф-лах (4.8) —(4.10) величина $v$ — количество радиостанций, работающих на одной частоте; $\lambda$ – интенсивность потока вызовов, создаваемого в час одной радиостанцией. Нетрудно видеть, что нагрузка, создаваемая одной радиостанцией в час, $y=\lambda T_{\text{п}}$.

*Численные результаты и оптимизация сети.* На основе изложенного выше алгоритма могут быть составлены программы расчета на различных ЭВМ величины эффективности функционирования сети прямой радиотелефонной связи. Полученные на ЭВМ «Наири» результаты приведены в виде графиков на рис. 4.28—4.36. На рис. 4.28 показаны зависимости основных характеристик радиосети (при $\lambda=2{,}5$ выз./ч и $T_{\text{п}}=0{,}5$ мин) от числа радиостанций в сети $v$.

Как видно, эффективность функционирования сети с ростом числа станций монотонно уменьшается, так как резко возрастают непроизводительные затраты времени на ожидание освобождения занятого радиоканала (рис. 4.29). При постоянной величине нагрузки вероятность застать радиоканал свободным ($q_{20}$) при увеличении числа станций также уменьшается. Однако пока величина $q_{20}>0{,}5$ вероятность того, что в сети имеется ровно один вызов ($q_{21}$), возрастает при увеличении числа станций. Если величина $q_{20}<0{,}5$, возрастают вероятности поступления в сеть 2, 3 и более вызовов, вследствие чего вероятность $q_{21}$ начинает уменьшаться. Максимум функции $q_{21}$ в зависимости от числа станций имеет место при

$$v_{\text{макс}q_{21}} = \frac{\sum_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!} y^k}{\frac{d}{dv}\sum_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!} y^k}. \qquad (4.11)$$

Формула (4.11) получена по аналогии с известным свойством простейшего потока, заключающимся в том, что вероятность поступления в течение промежутка времени длительности $t$ точно $k$ требований достигает наибольшего значения при $t=k/\lambda$.

На рис. 4.30 представлена зависимость оперативности связи $Q$ от числа радиостанций в сети при различных величинах нагрузки $y=\lambda T_{\text{п}}$. В отличие от эффективности функционирования оперативность радиосвязи однозначно определяется только величиной нагрузки:

$$Q=q_{20}q_{21}=\frac{vy}{\left[\sum_{k=0}^{v} \frac{v!}{(v-k)!} y^k\right]^2}. \qquad (4.12)$$

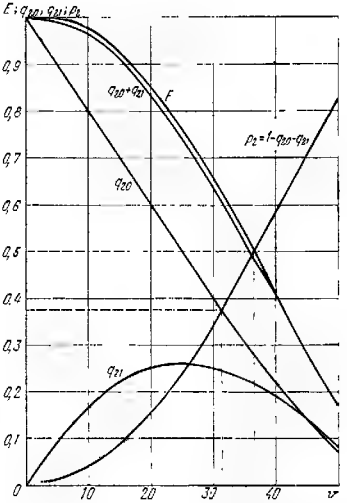



Рис. 4.28. Зависимости основных характеристик радиосети от числа радиостанций

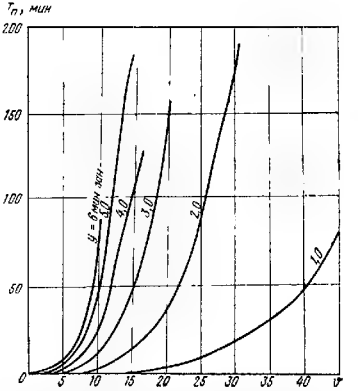



Рис. 4.29. Зависимость времени ожидания освобождения занятого радиоканала от числа радиостанций при разных значениях нагрузки

На рис. 4.30—4.36 приведены зависимости эффективности функционирования и оперативности связи от числа радиостанций, числа вызовов в чин и продолжительности разговора. Пользуясь этими

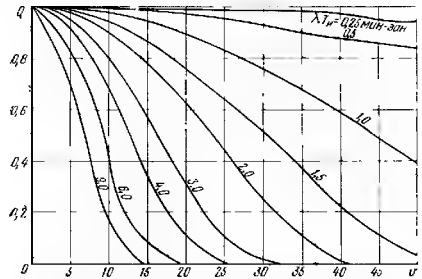



Рис. 4.30. Зависимость оперативности связи в радиосети от числа радиостанций при разных значениях величины нагрузки

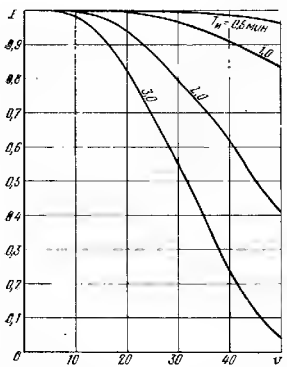



Рис. 4.31. Зависимость величины $E$ радиосети от числа радиостанций при разных значениях величины продолжительности разговора $T_п$

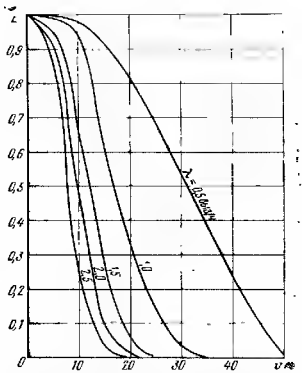



Рис. 4.32. Зависимость величины $E$ радиосети от числа радиостанций при разных значениях интенсивности потока вызовов $\lambda$

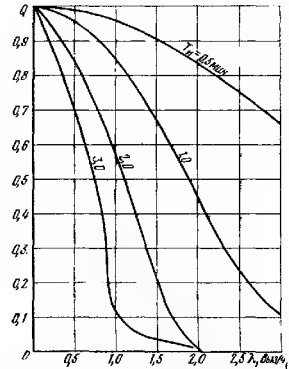



Рис. 4.33. Зависимость оперативности связи радиосети от интенсивности потока вызовов при разных значениях величины продолжительности разговора $T_н$

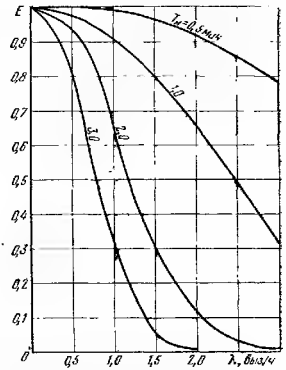



Рис. 4.34. Зависимость величины $E$ радиосети от интенсивности потока вызовов при разных значениях величины продолжительности разговора $T_н$

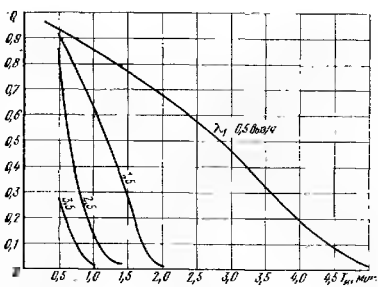



Рис. 4.35. Зависимость оперативности связи радиосети от продолжительности разговора при разных значениях величины интенсивности потока вызовов λ

кривыми, можно установить количество радиостанций, которое должно работать в радиосети при заданных условиях (например, при определенных величинах эффективности функционирования, оперативности связи или времени непроизводительных затрат), количество радиосетей, которое должно быть организовано для обеспечения связи с радиостанций, и решить другие вопросы построения прямой радиотелефонной связи.

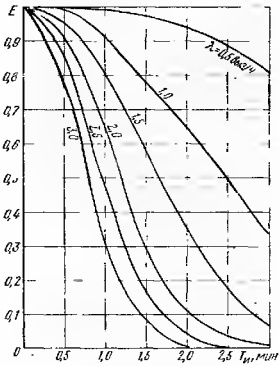



Рис. 4.36. Зависимость величины $E$ радиосети от продолжительности разговора при разных значениях интенсивности потока вызовов $\lambda$

## 4.6. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ГРОМКОГОВОРЯЩАЯ СВЯЗЬ

*Назначение.* На промышленных предприятиях и стройках используются два вида производственной громкоговорящей связи (ПГС):

а) с центральными усилителями — для озвучения открытых пространств, производственных территорий и помещений с целью передачи односторонних распоряжений, оповещения и поиска необходимых работников;

б) с абонентскими усилителями — для организации двух- и многосторонней связи между отдельными участками, связанными между собой технологически.

*Схема организации связи.* Производственная громкоговорящая связь с центральными усилителями организуется путем установки локальных радиотрансляционных узлов или усилителей на соответствующих объектах. В усилители включаются линии (фидеры) с громкоговорителями, размещаемыми по всей озвучиваемой территории. Поскольку информация, передаваемая по сети ПГС с центральными усилителями, носит оперативный характер, то обычно основным оператором, осуществляющим передачи по данной сети, является диспетчер. В соответствии с этим во всех диспетчерских пунктах, которые оснащаются такой связью, как правило, организуется дистанционное управление (включение и выключение; перевод из экономичного дежурного режима, когда выключено анодное напряжение электронных ламп, в рабочий; осуществление передачи) работой усилителей непосредственно с диспетчерского коммутатора. В тех случаях,

когда имеется широкий круг лиц, пользующихся рассматриваемой сетью связи, находят применение схемы, позволяющие дистанционно осуществлять передачи по сети ПГС с центральными усилителями не только с диспетчерского коммутатора, но и с телефонных аппаратов ПАТС путем набора соответствующего номера (см. разд. 4.2).

Количество громкоговорителей, которое необходимо установить для полного озвучения какой-либо территории, рассчитывается исходя из уровня и спектра производственных шумов. Данные измерений уровней производственных шумов в некоторых наиболее характерных подразделениях строительства показывают, что: а) уровни всех производственных шумов находятся в пределах 60÷94 дБ; б) уровни шумов на аналогичных объектах (автобазы, управления механизации и т. д.) примерно совпадают. Кроме того, измерениями установлено, что максимальные значения уровня шумов на объектах строительства имеют малую длительность по сравнению со средним уровнем (до 15÷20 с). В качестве примера на рис. 4.37 приводится гистограмма распределения уровней шу-

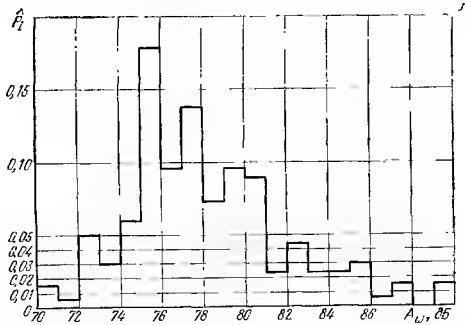



Рис. 4.37. Гистограмма распределения уровней шумов во времени

мов во времени, определенных на одном из объектов строительства. Как видно, с наибольшей вероятностью появляется шум с уровнем 75 дБ; более высокие и более низкие по уровню шумы имеют очень малые вероятности появления.

Гистограмма позволяет сделать вывод, что расчет числа громкоговорителей по максимальному уровню производственных шумов приведет к неоправданному увеличению полезной мощности, развиваемой громкоговорителями, так как фактическое отношение мощности полезного сигнала к мощности шумов в данном случае

будет больше требуемой величины. Поэтому число громкоговорителей следует рассчитывать по среднему (наиболее вероятному) значению уровней производственных шумов.

Установлено, что передаваемая по сети ПГС с центральными усилителями информация будет качественно принята на озвучиваемой территории, если уровень полезного сигнала превышает уровень шумов не менее чем на 5 дБ. Исходя из этого положения, рассчитывается требуемое число громкоговорителей на озвучиваемой территории [7].

Схема организации сети ПГС с центральными усилителями приведена в табл. 4.2, а в случае обеспечения выхода с ПАТС на эту сеть — на рис. 4.4.

Производственная громкоговорящая связь с абонентскими усилителями циркулярной системы применяется там, где технологические операции выполняются последовательно друг за другом (конвейер, поток и т. п.). Достоинствами такой системы являются:

а) передача производится с помощью самой простой манипуляции — путем нажатия единственной на аппарате кнопки;

б) все абоненты осведомлены о ходе технологического процесса, так как они прослушивают все ведущиеся разговоры;

в) прием не требует никаких манипуляций (нажатия кнопки, снятия микротелефонной трубки и т. п.), что способствует достижению большой оперативности в осуществлении передачи информации (особенно команд и распоряжений), а следовательно, и в ее использовании (исполнение команд и т. п.);

г) аппараты ПГС этой системы очень просты и надежны в работе;

д) для работы системы требуется одна линия, соединяющая между собой всех абонентов сети.

Недостатком данной системы является то, что каждый абонент вынужден прослушивать все ведущиеся разговоры по сети. Практика показывает, что в этих случаях абонент быстро утомляется.

Указанного недостатка лишена аппаратура ПГС избирательной системы. Для проведения разговора с нужным абонентом в данном случае необходимо на пульте ПГС нажать не одну единственную, а соответствующую этому абоненту кнопку. Возможно проведение и циркулярных переговоров. Аппараты рассматриваемой системы имеют более высокую стоимость, затраты на линейные сооружения также возрастают.

Отличие аппаратуры ПГС от диспетчерской телефонной с усилителями было указано в 4.3. Схема организации сети ПГС приведена в табл. 4.2.

*Модель процесса доставки информации.* В сетях производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями затраты времени на установление соединения состоят из величин $t_т$ и $t_5$, обусловленных необходимостью выполнения технических операций (включение центрального усили-

теля, подключение микрофона, выбор требуемого фидера) и недостаточным качеством тракта передачи информации. Так как усилителем, как правило, пользуется один диспетчер, то затраты на подход и различного рода ожидания здесь отсутствуют. Величина $t_т$ находится в пределах от 0,5 до 3 с, если усилитель находится в дежурном режиме, и составляет несколько минут, если усилитель выключен.

Качество производственной громкоговорящей связи зависит от уровня шумов в месте приема, расстояния абонента от громкоговорителя, высоты подвеса, угла наклона и типов применяемых громкоговорителей, типов усилителей и звукового давления на микрофон (при передаче). Методика расчета эффективного уровня формант, по величине которой определяется фразовая разборчивость, была приведена в разд. 3.5.

При определении вероятностных характеристик следует учитывать особенность производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями, заключающуюся в том, что в данном случае информация передается, как правило, только в одном направлении. Поэтому переспросы могут быть осуществлены только по другим сетям связи, что равносильно наличию срыва передачи информации в рассматриваемой сети.

До сих пор предполагали, что если какая-то часть информации будет одним абонентом не понята, он с вероятностью, равной единице, сделает переспрос. Можно считать, что для телефонной и радиосвязи это допущение является близким к действительности. Что касается производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями, то здесь необходимо отметить следующее:

а) так как абонент не может переспросить непосредственно в процессе передачи, то он обратится за разъяснением (с использованием другой сети связи) только в том случае, когда смысл переданного сообщения полностью непонятен или когда не были разобраны какие-то основные (например, цифры, фамилии и т. д.) моменты в переданном тексте;

б) тематика сообщений, передаваемых по сети ПГС с центральными усилителями, обычно ограничена, что облегчает правильное восприятие текста;

в) по сети ПГС с центральными усилителями любой текст обычно передается дважды. При фразовой разборчивости $J=0{,}968$ в случае двойной передачи одного и того же текста вероятность отсутствия правильного восприятия текста будет равна $(1-0{,}968)^2<0{,}001$, т. е. эта величина меньше заданной величины точности (выше мы принимали за меру точности 0,001). Поэтому можно считать, что при двойной передаче текста $J\approx 1$ в том случае, если фразовая разборчивость единичной передачи равна 0,968 и более. Если указанное условие не выполняется, то абоненты вынуждены обратиться к лицу, передавшему информацию, за разъяснениями, используя другие сети производственной связи.

Из изложенного следует, что система ПГС с центральными усилителями может находиться только в двух состояниях:

1) потери отсутствуют — текст принят правильно, полностью или частично, но в последнем случае общий смысл его понят;

2) имеются явные потери — не восприняты какие-то важные моменты текста, требующие дополнительных справок, или смысл текста полностью непонятен.

Учитывая ограниченную тематику сообщений, можно предположить, что явные потери не появятся, если суммарная фразовая артикуляция будет свыше 0,97 (хорошее качество). Это соответствует фразовой артикуляции при однократной передаче сообщения, равной 0,83. Вероятность отсутствия непроизводительных затрат времени из-за недостаточной артикуляции равна произведению вероятностей двух независимых событий:

а) уровень шума в месте приема, ограниченном определенной площадью, соответствует фразовой разборчивости не ниже 0,83 при однократной передаче текста;

б) абонент находится на таком расстоянии $l$ от громкоговорителя, что фразовая разборчивость (при данном уровне шума) не меньше 0,83.

Таким образом,

$$q_{\text{б}} = \left(1 - t_{A_{\text{ш}}}\right)(1 - t_l), \tag{4.13}$$

где $t_{A\,\text{ш}}$ — время, в течение которого уровень шума выше уровня, соответствующего фразовой разборчивости 0,83; $t_l$ — время, в течение которого абонент находится на таком расстоянии от громкоговорителя, при котором в данных условиях фразовая разборчивость меньше 0,83.

Среднее время непроизводительных затрат $t_{\text{б}}$ может быть принято равным величине $T = T_{\text{и}} + T_{\text{п}}$, где $T_{\text{и}}$, $T_{\text{п}}$ — относятся к сети производственной автоматической телефонной связи или соответствующим сетям диспетчерской связи.

Сети двусторонней производственной громкоговорящей связи разделяются на избирательные (несколько параллельных каналов связи) и циркулярные (один канал обслуживания). В обоих случаях требуется определенное время на подход к аппарату производственной громкоговорящей связи при исходящей связи (для нажатия кнопки) и нет надобности в этом подходе при входящей связи (в таком аппарате имеется громкоговоритель). Поскольку аппараты производственной громкоговорящей связи устанавливаются для организации технологической связи, то вероятность ожидания освобождения этого аппарата при исходящей связи от ведения предыдущей передачи информации практически равна нулю. Время, необходимое для установления соединения, как правило, составляет 0,5÷2 с.

В системах и циркулярной, и избирательной связи могут возникнуть непроизводительные затраты времени, связанные с возможностью поступления числа вызовов, превышающего количе-

ство каналов обслуживания. Формулы для расчета этих затрат приведены в разд. 2.1.

При циркулярной системе занятость вызываемого абонента исключена, если свободен канал связи. Поэтому $q_з=1$ и $t_з=0$. Для избирательной связи такая занятость может иметь место. Соответствующие формулы были приведены выше.

С точки зрения качества разговорного тракта производственная громкоговорящая связь с абонентскими усилителями (как циркулярной, так и избирательной системы) может рассматриваться по аналогии с телефонной и радиосвязью, поскольку передача информации здесь также двусторонняя.

Алгоритмы расчета эффективности функционирования для всех сетей производственной громкоговорящей связи принципиально не отличаются от вышеизложенных, и здесь, во избежание повторений, не приводятся. Численные результаты расчетов во многом повторяют приведенные в предыдущих разделах, и читатель может получить их самостоятельно. Задаваясь величиной эффективности функционирования или оперативности связи, можно определить число громкоговорителей, абонентских пунктов, усилителей и т. д. приемами, описанными в предыдущих разделах. Вероятность отсутствия затрат времени из-за недостаточного качества тракта определяется по ф-ле (4.13).

## 4.7. ТЕЛЕГРАФНАЯ, ФОТОТЕЛЕГРАФНАЯ СВЯЗЬ И ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

На промышленных предприятиях и в строительстве в основном используется абонентский телеграф, хотя в некоторых случаях применяются и сети прямой телеграфной связи (на транспорте, в черной металлургии и т. д.). Схемы организации этих сетей приведены в табл. 4.2. Эффективность функционирования сети абонентского телеграфа рассчитывается аналогично сети производственной автоматической телефонной связи, и процесс установления соединения характеризуется теми же зависимостями, которые были рассмотрены выше. Отличие состоит только во влиянии недостаточного качества тракта на суммарную эффективность. Как указывалось в разд. 3.5, механизм указанного влияния для документированной связи несколько отличается от недокументированной связи. Эффективность функционирования прямой телеграфной связи рассчитывается аналогично прямой телефонной связи и радиосвязи при числе абонентов в сети, равном двум (см. разд. 4.3), с использованием параметров, характеризующих каждую конкретную сеть прямой телеграфной связи.

Фототелеграфная связь может осуществляться с использованием как коммутационного оборудования АТС, так и прямых линий. В первом случае эффективность функционирования сети в основном определяется значением этого показателя для АТС. Во втором случае решающее значение имеют качество трак-

та передачи и надежность аппаратуры. В обоих случаях время собственно передачи информации зависит в основном от конструкции аппаратуры, но может зависеть и от качества тракта, так как при низком качестве возможна двойная, тройная и т. д. передача изображения, что соответственно увеличивает величину $T_и$.

В последние годы в связи с необходимостью передачи информации на вычислительные центры разработана специальная аппаратура, получившая название аппаратуры передачи данных (АПД) и обеспечивающая высокую скорость (до 2400 бод) и достоверность ($10^{-6} \div 10^{-8}$) передачи цифровой информации по коммутируемым и некоммутируемым телефонным каналам. АПД может работать и по телеграфным каналам со скоростью 50 ÷ 200 бод. Несомненно, что в ближайшем будущем АПД станет важнейшим элементом технической базы автоматизированных систем управления. Некоторые схемы организации этих сетей приведены в [111]. Эффективность передачи информации с помощью данной аппаратуры определяется схемой организации связи (наличием или отсутствием коммутации), параметрами коммутационных устройств (если они имеются), качеством и надежностью тракта передачи. Несмотря на некоторую специфичность сетей передачи данных, характеристики эффективности функционирования этих сетей могут быть определены аналогично рассмотренным выше для других сетей производственной связи.

## 4.8. АРЕНДА МЕЖДУГОРОДНЫХ КАНАЛОВ

В некоторых случаях при организации связи в масштабе отрасли, подотрасли, а иногда крупных промышленных и строительных объединений для передачи информации используются арендованные междугородные каналы. Как известно, по существующим тарифам оплачивается все время аренды вне зависимости от фактического занятия каналов, причем стоимость одной минуты арендования канала и стоимость одной минуты «чистого» разговора, как правило, равны друг другу [1].

При пользовании заказной системой междугородной связи среднее время ожидания разговора зависит от общей величины телефонной нагрузки в данном направлении в общегосударственной системе междугородной связи. Можно считать, что среднее время ожидания предоставления абоненту заказанного междугородного разговора зависит не от создаваемой этим абонентом нагрузки, а от состояния сети общего пользования, которая в данном случае может рассматриваться как система с бесконечным количеством источников нагрузки. В этих предпосылках время ожидания разговора на сети общего пользования есть величина случайная, имеющая математическое ожидание $T_0$, которое для указанных условий принимается величиной постоянной: $T_0$=const. Денежные затраты на междугородные разговоры определяются

[1]) Здесь и ниже не учтено недавнее снижение цен на аренду каналов.

как $C_{\text{ог}}=60cy$, где $y$ — исполненная в рассматриваемый отрезок времени телефонная нагрузка, ч.-зан, которая в соответствии с первым толкованием нагрузки [24, 96] может быть представлена как общее время в долях часа-занятия междугородного канала данным абонентом по требуемому направлению; $c$ стоимость 1 мин разговора по требуемому направлению, руб.

При аренде междугородных каналов денежные затраты на содержание в течение одного часа $n$ каналов (без учета эксплуатационных расходов на междугородные узлы), как указывалось в самом начале данного раздела, не зависят от величины поступающей нагрузки и равны $C_A=60cn$. Среднее время ожидания заказанного разговора при аренде $n$ междугородных каналов, наоборот, целиком определяется величиной нагрузки $y=\lambda T_{\text{н}}$, где $\lambda$ — среднее число вызовов в единицу времени; $T_{\text{н}}$ — среднее время разговора. Среднее время ожидания разговора, когда арендуется $n$ каналов, определяется по формуле

$$T_A=\frac{p_n T_{\text{н}}}{n-y}, \tag{4.14}$$

где $p_n$ — вероятность того, что все каналы заняты:

$$p_n=\frac{y^n}{(n-1)!(n-y)}\,p_0, \tag{4.15}$$

где $p_0$ — вероятность того, что все каналы свободны:

$$p_0=\frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{n-1}\frac{y^k}{k!}+\frac{y^n}{(n-1)!\,(n-y)}}. \tag{4.16}$$

Таким образом, при аренде междугородных каналов время ожидания разговора является функцией величины нагрузки, а величина затрат от нагрузки не зависит. При заказной системе междугородной связи, наоборот, величина затрат является функцией телефонной нагрузки, а среднее время ожидания разговора представляет собой постоянную величину в указанном выше смысле.

При существующей тарифной системе денежные затраты на арендование канала (или каналов) больше величины $C_{\text{ог}}$, так как всегда $y<n$. Следовательно, всегда обеспечивается неравенство: $C_{\text{ог}}<C_A$. С другой стороны, варьируя при данной нагрузке величиной $n$, можно добиться, чтобы было выполнено условие $T_A<T_0$. В этом случае будет экономия во времени за счет того, что разговор при арендовании каналов будет представляться раньше, чем при заказной системе междугородной связи. Поэтому, если известна стоимость минуты сэкономленного времени $\psi$, то количество каналов, которые должны арендоваться, легко может быть определено из неравенства: $C_A-C_{\text{ог}}\leqslant\psi\lambda(T_0-T_A)$. Отсюда

$$n\leqslant\frac{\psi\lambda(T_0-T_A)}{60c}+y.$$

По этой формуле подбором (так как величина $T_A$ зависит от числа каналов) находится $n$. Если $n \geqslant 1$, то арендование каналов экономически оправдано и должно производиться.

На практике величина $\psi$, как правило, неизвестна и определение целесообразности аренды каналов чисто экономическими методами не представляется возможным. Поэтому для решения указанной задачи должен быть применен другой метод, основанный на сравнении загрузки арендованных каналов с ростом затрат. Если величина нагрузки, поступающей (при постоянном $n$) в течение рассматриваемого отрезка времени, будет неограниченно возрастать, то наступит момент, когда величина $T_A$ станет равной величине $T_0$. В данном случае арендование каналов безусловно нецелесообразно, так как $C_{0г} < C_A$, а экономии по времени предоставления междугородного разговора нет. Величина нагрузки, как следует из формулы для $T_A$, будет равна

$$y_{\text{макс}} = n - \frac{\rho_n T_и}{T_0} . \qquad (4.17)$$

Если $y > y_{\text{макс}}$, то необходимо рассмотреть вопрос либо об арендовании большего количества каналов, либо об использовании заказной системы междугородной связи. Следовательно, имеется верхняя граница целесообразности арендования канала, равная $y_{\text{макс}}$. Если $y < y_{\text{макс}}$, среднее время ожидания в случае арендования каналов меньше, чем при пользовании системой заказной междугородной связи, и абоненты имеют соответствующую экономию времени.

По мере роста величины поступающей телефонной нагрузки разница в величинах затрат $C_A - C_{0г} = 60c(n-y)$ неуклонно уменьшается и становится равной нулю при $y_{\text{макс}} = n$, когда арендование каналов нецелесообразно из-за того, что $T_0 < T_A$. Другими словами, равенство затрат достигается за пределами верхней границы целесообразности арендования канала ($y_{\text{макс}} > y_{\text{макс}}$).

Таким образом, если нагрузка $y < y_{\text{макс}}$, то при арендовании междугородных каналов имеют место: 1) выигрыш по величине среднего времени ожидания разговора; 2) проигрыш по величине затрат. Введем относительные характеристики этих факторов. Относительный выигрыш по величине среднего времени ожидания

$$x_t = \frac{T_A}{T_0} = \frac{\rho_n T_и}{T_0 (n-y)} , \qquad (4.18)$$

относительный проигрыш по величине затрат

$$x_м = \frac{C_{0г}}{C_A} = \frac{60cy}{60cn} = \frac{y}{n} . \qquad (4.19)$$

Оба показателя являются функциями величины телефонной нагрузки. На рис. 4.38 приведены указанные зависимости при $n = 1$. Как видно, относительные характеристики $x_м$ и $x_t$ «зеркально»

отражают интересующие нас процессы: $x_м$ возрастает пропорционально уменьшению разницы в затратах, а $x_t$ увеличивается соответственно уменьшению разницы между величинами среднего времени ожидания по рассматриваемым системам организации связи.

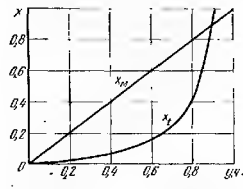



Рис. 4.38. Зависимости $x_t = \Phi(y)$ и $x_м = \Phi(y)$ при $n=1$

При одном арендованном канале междугородной связи:

$$p_0 = 1 - y;\ p_n = y;\ T_A = T_и \frac{y}{1-y}.$$

Отсюда

$$x_t = \frac{T_и}{T_0} \frac{y}{1-y}. \qquad (4.20)$$

Для удобства рассмотрения целесообразно на рис. 4.38 перенести начало координат в точку (1; 1) и повернуть относительно данной точки систему координат так, чтобы прямая $x_м$ стала осью абсцисс (на +135°). После этих операций выражения для введенных нами относительных характеристик примут вид:

$$x'_t = 0{,}7\left(-\frac{T_и}{T_0}\frac{y}{1-y} + y\right); \qquad (4.21)$$

$$x'_м = 1{,}4 - 0{,}7\left(\frac{T_и}{T_0}\frac{y}{1-y} + y\right). \qquad (4.22)$$

График зависимости $x'_t = \Phi(x'_м)$ представлен на рис. 4.39. Из графика следует, что данная функция представляет собой параболу, пересекающую ось абсцисс ($x'_t = 0$) в двух точках:

1) при величине $y = 1 - \frac{T_и}{T_0}$; 2) при величине $y = 0$.

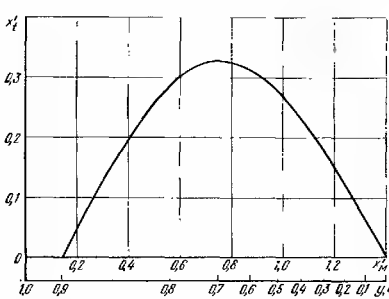



Рис. 4.39. Зависимость относительного выигрыша по времени от относительного проигрыша по затратам

Именно при таких значениях нагрузки аренда каналов абсолютно неэффективна:

а) в первом случае из-за того, что среднее время ожидания разговора становится равным $T_0$; проигрыш в затратах здесь минимальный;

б) во втором случае из-за отсутствия нагрузки — затраты не оправданы; проигрыш в затратах наибольший.

Таким образом, получен график зависимости выигрыша во времени от проигрыша в затратах. Эта функция имеет четко выраженный максимум. При значениях $x'_{м} < x_{м\,макс}$, выигрыш в среднем времени ожидания при арендовании канала возрастает относительно увеличения проигрыша в затратах. Можно считать, что эта область значений $x'_t$ соответствует эффективной аренде междугородного канала. Следовательно, границами эффективности аренды междугородного канала являются величины

$$y(x_{t\,макс}) \leqslant y < 1 - \frac{T_и}{T_0},$$

где $y(x_{t\,макс})$ — величина нагрузки, соответствующая максимуму $x_t$. При значениях нагрузки меньше $y(x_{t\,макс})$ перерасход затрат не дает ощутимого результата, так как абоненты обращаются к междугородной связи недостаточно интенсивно. При значениях нагрузки больше величины $1 - \frac{T_и}{T_0}$, как указывалось выше, канал перегружается. Определим величину $y(x_{t_{макс}})$. Для этого необходимо взять первую производную $x'_t$ и приравнять ее нулю:

$$\frac{dx'_t}{dy} = 0{,}7 - \frac{0{,}7T_и}{T_0} \frac{1}{(1-y)^2} = 0.$$

Отсюда

$$y^2 - 2y + 1 - \frac{T_и}{T_0} = 0.$$

Решив квадратное уравнение, получим

$$y = 1 - \sqrt{\frac{T_и}{T_0}}.$$

Перед радикалом необходимо взять знак минус. Тогда окончательно при $n=1$ имеем

$$y(x_{t_{макс}}) = 1 - \sqrt{\frac{T_и}{T_0}}. \qquad (4.23)$$

Например, при $T_и/T_0 = 0{,}1$

$$y(x_{t_{макс}}) = 1 - \sqrt{T_и/T_0} = 0{,}684.$$

Следовательно, пределами целесообразности аренды канала являются величины нагрузки:

$$0{,}684 < y < 1 - \frac{T_и}{T_0} = 0{,}9.$$

В общем случае следовало бы заменить параметрическую форму записи зависимостей $x'_t = \Phi(y)$ и $x'_м = \Phi(y)$ функциональной $x'_t = \Phi(x'_м)$. Однако расчетные формулы при этом оказываются весьма громоздкими и неудобными для практического использования.

Формула (4.23) позволяет определить часы, в течение которых целесообразно арендовать междугородный канал. С этой целью фактическая нагрузка, поступающая в каждый рассматриваемый час, сравнивается с величиной $y(x_{t_{макс}})$. При $n>1$ расчетная формула для $y(x_{t_{макс}})$ получается с учетом зависимости величины $x'_t$ от количества каналов, задаваемой ф-лой (4.18).

В заключение отметим, что аналогичные результаты можно получить при сравнении немедленной и скорой систем эксплуатации междугородной телефонной связи с системой арендования каналов. Однако при этом, как правило, существенно изменяется математическое ожидание времени предоставления разговора $T_0$, которое приближается к величине $T_д$. Поэтому область целесообразности арендования каналов значительно сужается.

Равенство стоимости 1 мин разговора по сравниваемым системам эксплуатации междугородной связи в некоторых случаях может не обеспечиваться. Тогда в ф-лу (4.19) должен быть введен поправочный коэффициент, равный отношению стоимости 1 мин переговоров по заказной системе к такой же стоимости по арендованным каналам. Следует еще раз подчеркнуть, что из рассмотрения были исключены затраты на эксплуатацию системы с арендованием каналов, которые составляют заметную величину для абонента, арендующего каналы.

Важно отметить, что сравнение выше производилось с учетом времени ожидания начала разговора. В ряде случаев этого оказывается недостаточно и должна быть учтена пропускная способность сети, особенно для сетей передачи данных. В [111] приводятся данные об экономической целесообразности арендования каналов для передачи данных в зависимости от длины линии связи и ряда других факторов.

# ГЛАВА ПЯТАЯ

## *Затраты на строительство и обеспечение функционирования систем производственной связи*

### 5.1. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ПРИВЕДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ

Принятие проектно-плановых решений осуществляется на основе экономической эффективности систем производственной связи. Экономическая эффективность системы связи — это отношение полученного результата к затратам, обеспечивающим данный результат.

Выше при рассмотрении функционирования систем передачи информации нам были безразличны затраты на ее создание и поддержание в работоспособном состоянии. Иное дело, если система связи рассматривается как экономический объект. Тогда можно считать, что она функционирует за счет авансирования определенных затрат для получения нужного результата. При этом должна учитываться необходимость дальнейшего расширения системы в будущем, связанная с общим экономическим ростом, увеличением контингента обслуживания и т. д.

Нетрудно видеть, что с помощью существующей системы связи можно достичь требуемых результатов двумя способами: либо за счет введения в действие резерва мощности, т. е. экстенсивным путем, либо за счет повышения эффективности функционирования системы, т. е. более интенсивным использованием имеющихся каналов и оборудования связи. Если имеющегося резерва мощности недостаточно для передачи требуемого объема сообщений, он может быть создан за счет соответствующих капитальных вложений.

Сопоставление результатов, полученных от системы связи, и затрат, произведенных на нее, требует измерения их в одних и тех же оценках.

При оценке затрат необходимо учитывать экономическую неравноценность капитальных вложений и эксплуатационных расходов. Известно, что больший объем единовременных капитальных вложений позволяет, как правило, в последующем эксплуатировать систему связи с меньшими текущими (эксплуатационными) затратами. Если текущие затраты $Э$ являются функцией от капитальных затрат $C$, то коэффициентом, определяющим соотношение указанных

двух видов затрат, является первая производная функции $E_н = \frac{d\vartheta}{dC}$.

Производная $E_н$ в дискретной форме при сравнении двух вариантов является известным нормированным коэффициентом экономической эффективности, который определяется как

$$E_н^* = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{C_1 - C_2}, \qquad (5.1)$$

где $\vartheta_1$, $\vartheta_2$ — текущие (эксплуатационные) затраты соответственно по первому и второму вариантам; $C_1$, $C_2$ — капитальные затраты по этим вариантам.

Из ф-лы (5.1) следует, что из группы рассматриваемых вариантов наиболее эффективен при прочих равных условиях такой, который обеспечивает равенство: $\vartheta + E_н C = \text{минимум}$. Это равенство является наиболее общим и важнейшим условием экономической целесообразности принятия того или иного проектного решения.

Коэффициент экономической эффективности $E_н$ непосредственно связан с результатом работы системы, связи, т. е. с экономическим эффектом, который достигается за счет воздействия этой системы на ход основного производства. Указанный эффект зависит также и от величин капитальных и эксплуатационных затрат.

В наиболее общем виде экономический эффект от использования системы связи представляет собой разность:

$$\chi = \pi - И, \qquad (5.2)$$

где $\pi$ — продукция системы связи, стоимостная оценка результата воздействия системы связи на основное производство; $П$ — приведенные затраты на данную систему связи. В соответствии с [154] величина приведенных затрат определяется по формуле

$$П = \frac{\vartheta + E_н C}{(1 + E_{нп})^t}, \qquad (5.3)$$

где $E_{нп}$ — норматив для приведения затрат более поздних лет к текущему моменту; $t$ — период времени приведения в годах.

В условиях действующего порядка начисления амортизации основных фондов $E_{нп} = 0{,}08$. Решая конкретные задачи проектирования систем производственной связи, можно принять знаменатель дроби (5.3) за постоянную величину и рассматривать функцию приведенных затрат в виде

$$П \approx \vartheta + E_н C. \qquad (5.3')$$

Экономическая эффективность $\eta$ в соответствии с данным выше определением может быть рассчитана как отношение

$$\eta = \frac{\pi}{П}. \qquad (5.4)$$

Нетрудно видеть, что синтез оптимальных систем производственной связи (выбор оптимальных вариантов организации связи,

типа и количества оборудования и т. п.) может быть осуществлен только после нахождения величин $\pi$ и $П$, так как лишь с их помощью можно определить величину достигаемого экономического эффекта и экономической эффективности. В настоящее время нет методики, которая позволила бы определить продукцию системы производственной связи. Можно сказать, что продукция системы производственной связи, а следовательно, экономическое эффект и эффективность зависят от величины эффективности функционирования $E$. Но от нее зависит и величина приведенных затрат $П$ — чем выше эффективность функционирования, тем больше величина затрат. Однако и эти зависимости количественно в настоящее время не определены.

В связи с изложенным, синтез систем производственной связи в данное время осуществляется: либо по максимуму эффективности функционирования в предположении, что величина приведенных затрат по сравниваемым вариантам одинакова; либо по минимуму приведенных затрат в предположении, что эффективность функционирования по сравниваемым вариантам одинакова.

В предыдущей главе были рассмотрены вопросы оптимизации систем по критерию эффективности функционирования. Последующие главы посвящены вопросам оптимизации систем по критерию минимума приведенных затрат. Поэтому настоящая глава отведена изучению структуры и количественных характеристик приведенных затрат. Сведение общей задачи оптимизации систем производственной связи к двум указанным выше частным случаям, очевидно, представляет собой неизбежный шаг на пути развития производственной связи ввиду отсутствия методики определения величины продукции этих систем. Однако было бы неправильным полагать, что подобное упрощение является только вынужденным шагом, приводящим к значительной потере точности. Большое разнообразие практических задач проектирования сетей производственной связи позволяет выделить такие из них, которые с достаточной для этих целей точностью дают возможность принять указанные выше допущения о постоянстве величины эффективности функционирования при варьировании приведенными затратами или о постоянстве приведенных затрат при варьировании эффективностью функционирования. Некоторые из этих задач рассматривались в гл. 4, другие встречаются в гл. 7 и 8.

## 5.2. ХАРАКТЕРИСТИКА И СТРУКТУРА КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

Величина капитальных затрат имеет решающее значение при определении экономической эффективности систем производственной связи. Чем быстрее осуществляется передача информации, тем больше эти затраты. Однако величины капитальных затрат ограничиваются исходя из народнохозяйственных соображений. Они должны окупаться в течение срока не выше нормативного, установ-

ленного для каждой отрасли, где создаются системы производственной связи. Указанные факторы, действующие в противоположных направлениях, позволяют установить для каждой системы производственной связи ту величину капитальных вложений, которая обеспечит получение соответствующего народнохозяйственного эффекта при достаточных уровнях собственной эффективности функционирования и эксплуатационных расходов.

Величина капитальных вложений на строительство системы производственной связи определяется на предпроектной стадии по укрупненным показателям (см. гл. 6) или на основе статистических закономерностей; при конкретном проектировании — по сметам к техническим проектам (при двухстадийном проектировании) или к техно-рабочим проектам (при одностадийном проектировании).

В структуру капитальных вложений входят исчисляемые независимо друг от друга следующие виды затрат:

- на строительные работы;
- на монтажные работы;
- приобретение оборудования;
- приобретение инструментов и производственного инвентаря;
- прочие затраты.

Строительные работы при создании систем оперативной связи делятся на гражданские и линейные. К гражданским работам относится строительство зданий со всем комплексом санитарно-технических и осветительных устройств, а к линейным работам — строительство и реконструкция линейно-кабельных сооружений, мачтовых и антенных устройств.

Монтажные работы включают в себя сборку и установку производственного, энергетического и другого вида оборудования, внутренние проводки, прокладку питающих кабелей на объекте строительства и т. д.

Оборудование подразделяется на производственное, энергетическое и др. Санитарно-технические устройства, как и кабели связи, относятся к материалам. Оборудование может требовать монтажа для ввода его в действие (АТС, коммутаторы и т. д.) и не требовать его (станки, измерительные приборы и т. п.).

К приобретениям относятся расходы на инструменты и инвентарь, зачисляемые в основные средства, если они имеют стоимость более 50 руб. за единицу или срок службы более одного года.

Прочие затраты предусматривают затраты на содержание дирекций строящихся систем производственной связи, подготовку эксплуатационных кадров, отвод земельных участков и т. п.

Практика строительства систем производственной связи показывает, что стоимость строительно-монтажных работ может составлять до 35—40% от общей стоимости системы. Эта стоимость, в свою очередь, разбивается на две части: прямые затраты и накладные расходы.

К прямым затратам относятся: заработная плата рабочих, стоимость строительных и монтажных материалов, транспорт-

ные расходы по доставке материалов на места строительства, стоимость эксплуатации строительных механизмов и т. д.

Накладные расходы включают в себя дополнительную заработную плату, социальное страхование, затраты на охрану труда, технику безопасности, культурно-бытовое обслуживание рабочих, на организацию производства (ложарная охрана, набор рабочих, содержание производственного оборудования и инвентаря строительных организаций и т. д.), административно-хозяйственные расходы строительных организаций.

Стоимость оборудования и материалов в сметах определяется по отпускным оптовым ценам на основании действующих прейскурантов. Сметная стоимость материалов и оборудования, кроме отпускных цен включает: а) расходы на тару и упаковку; б) наценки снабженческих и сбытовых организаций; в) транспортные расходы на доставку материалов и оборудования к месту работ; г) заготовительно-складские расходы.

Приобретения и прочие затраты ориентировочно составляют 1% от суммарной стоимости строительно-монтажных работ и оборудования. Нормы накладных расходов на строительно-монтажные работы устанавливаются дифференцированно в зависимости от видов работ. Кроме накладных расходов, учитываются следующие начисления: плановые накопления — в размере 2,5% от стоимости прямых затрат и накладных расходов для всех строительных и монтажных работ; заготовительно-складские расходы — в размере 2,1% от стоимости строительных и монтажных материалов, 1,2% от стоимости оборудования и 0,9% от стоимости металлических конструкций.

В соответствии со структурой затрат стоимость строительных работ может быть определена по формуле [72]:

$$C_{стр} = (C_р + 1{,}021C_м + C_с)\left(1 + \frac{H}{100}\right)1{,}025,\ \text{руб.}, \qquad (5.5)$$

где $C_р$ — основная заработная плата строительных рабочих, руб.; $C_м$ — стоимость материалов и готовых изделий с учетом транспортных расходов, руб.; $C_с$ — затраты на эксплуатацию строительных машин, руб.; 1,021 — коэффициент, учитывающий заготовительно-складские расходы; $H$ — норма накладных расходов, %; 1,025 — коэффициент, учитывающий плановые накопления.

Стоимость монтажных работ [72]:

$$C_{монт} = (\kappa C_р + 1{,}021C_м + C_с)\,1{,}025,\ \text{руб.} \qquad (5.6)$$

где $\kappa$ — коэффициент, учитывающий накладные расходы к основной заработной плате рабочих и равный при норме накладных расходов 80% — 1,8; 100% — 2,0; 124% — 2,24.

В практике создания систем производственной связи смета является единственным документом, определяющим стоимость строительства. В соответствии с ней производится финансирование работ и ведутся все расчеты между заказчиком и подрядчиками. При раз-

работке систем производственной связи необходимо рассмотреть огромное количество различных вариантов, отличающихся между собой, в частности и величиной капитальных вложений, с целью выбора наиболее отвечающего поставленным требованиям. Перебор всех возможных вариантов с составлением сметы для каждого из них практически неосуществим не только «вручную», но даже с применением быстродействующих ЭВМ. Задача синтеза оптимального варианта построения системы производственной связи значительно упрощается, если рассматривать величину капитальных затрат как функцию от параметров, определяющих состав указанной системы и взаимосвязи составляющих ее элементов. При этом если эта функция окажется непрерывной, то поставленная задача становится аналитически разрешимой. В данном случае оптимальный вариант выбирается простым расчетом, в результате чего экономится значительное количество времени и появляется уверенность в том, что выбранный вариант является действительно оптимальным в заданном смысле.

Для достижения указанных условий необходимо представить выражение капитальных затрат в виде функции от интересующих нас показателей. Это достигается математико-статистическими методами (см. гл. 2).

## 5.3. ВИДЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Величина капитальных затрат, необходимых для создания системы производственной связи, характеризует только одну сторону этой системы, рассматриваемой как экономический объект. Созданная система должна поддерживаться в работоспособном состоянии, что также требует определенных средств. Если капитальные затраты единовременны, то затраты, необходимые для поддержания системы производственной связи в работоспособном состоянии, производятся в течение всего времени существования данной системы. Эти затраты, получившие название эксплуатационных расходов, являются выраженной в денежной форме себестоимостью продукции, создаваемой системой производственной связи. Поэтому крайне желательно обеспечить минимально возможную величину эксплуатационных расходов.

Как и капитальные затраты, эксплуатационные расходы состоят из отдельных элементов, образующих их структуру. К элементам эксплуатационных расходов относятся:

— заработная плата производственных работников основной деятельности;

— отчисления на социальное страхование;

— затраты на материалы и запасные части;

— расходы на оплату электроэнергии для производственных нужд;

— амортизационные отчисления;

— прочие производственные и транспортные расходы;

— общие расходы по управлению и обслуживанию производства.

Заработная плата рассчитывается исходя из численности производственных работников и ставок заработной платы, утвержденных соответствующими ведомствами. Численность производственных работников определяется исходя из количества средств производственной связи и нормативов на их обслуживание. В табл 5.1 приводятся сравнительные данные о нормативах обслуживания средств производственной связи, принятых для трех различных министерств. Из этой таблицы следует, что имеется разница между приведенными нормативами, причем по некоторым показателям нормируются разные величины (километры или канало-километры канализации, телевизионная установка в целом или передающая камера и т. д.). В гл. 9 рассматривается несколько иной способ определения численности производственного персонала с учетом специфики каждого производства.

При определении общего фонда заработной платы к сумме основной зарплаты делаются начисления на оплату замещения отпускников и выплату премий. Процент этих начислений устанавливается соответствующими ведомствами и обычно составляет: до 6% — на оплату замещения отпускников; до 15% — на выплату премии. К общей сумме заработной платы производственным работникам начисляется 5,3—7,5% на социальное страхование.

Затраты на материалы и запасные части, так же как и затраты на заработную плату, определяются по действующим нормативам, хотя могут быть определены с помощью теории массового обслуживания и теории надежности. Для укрупненных расчетов затраты на материалы и запасные части принимаются в размере 1% от стоимости станционных и 0,5% от стоимости линейных сооружений.

В табл. 5.2 приводятся данные о стоимости материалов на текущее содержание устройств производственной связи, принятые в системе железнодорожного транспорта. В аппаратуре вч уплотнения, радиорелейной связи и другой, где основные расходы падают на электронные лампы, их стоимость принимается равной 80% всех расходов на материалы и запасные части.

Стоимость производственной электроэнергии определяется исходя из потребляемой аппаратурой электроэнергии, времени работы аппаратуры и стоимости 1 кВт·ч местной электроэнергии. Годовые затраты на оплату электроэнергии $Э_э$ определяются по формуле:

$$Э_э = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i t_i}{1000\eta} 365р, \text{ руб.},$$

где $p_i$ — мощность, потребляемая $i$-м прибором или $i$-й системой, Вт; $t_i$ — время работы в сутки $i$-го прибора или системы; $n$ — коли-

Таблица 5.1

НОРМАТИВЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ, ПРИНЯТЫЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МИНИСТЕРСТВ

| Наименование обслуживаемых средств и сооружений | Единица измерения | Норматив обслуживания, ч/мес., принятый для министерства | | |
|---|---|---|---|---|
| | | черной металлургии | путей сообщения | энергетики и электрификации |
| Диспетчерские коммутаторы | монтированный номер | 0,167 | 0,16 | 0,1 |
| Радиостанция стационарная, мощностью: | | | | |
| не более 20 Вт | станция | 11 | 11 | 5 |
| » 100 » | » | 11 | 11 | 20 |
| » 500 » | » | 11 | 11 | 40 |
| Радиостанция переносная или передвижная мощностью: | | | | |
| не более 20 Вт | » | 30 | 30 | 10 |
| » 100 » | » | 30 | 30 | 30 |
| Промышленная телевизионная установка | установка, передающая камера | — 15 | 45 — | 45 — |
| Установка громкоговорящей связи мощностью: | | | | |
| не более 50 Вт | установка | 4 | 4 | 7 |
| » 100 » | » | 7 | 7 | 7 |
| » 500 » | » | 15 | 15 | 15 |
| свыше 500 » | » | 15 | 20 | 20 |
| Громкоговорители, установленные внутри помещения | громкоговоритель | 0,6 | 0,58 | 0,85 |
| То же, мощностью 10 Вт, в производственных цехах и на открытом воздухе | » | 2,7 | 2,67 | 0,5 |
| То же, мощностью свыше 10 Вт | » | 4,0 | 2,67 | 0,5 |
| Охранная сигнализация | пункт | 0,5 | 2,0 | 1 |
| Пожарная сигнализация | пост | 0,5 | 0,67 | 0,4 |
| Электрочасовая установка | вторичные электрочасы | 1,0 | — | 0,4 |
| Электрозаписывающая аппаратура | комплект | 4,83 | — | 14 |
| Абонентские установки при кабельных вводах с аппаратами ЦБ | абонентская точка | 0,016 | 0,55 | 0,18 |
| То же, с аппаратами АТС | » | 0,016 | 0,64 | 0,18 |

*Продолжение*

| Наименование обслуживаемых средств и сооружений | Единица измерения | Норматив обслуживания, ч/мес., принятый для министерства | | |
|---|---|---|---|---|
| | | черной металлургии | путей сообщения | энергетики и электрификации |
| При воздушных вводах с аппаратами ЦБ | абонентская точка | 0,016 | 0,27 | 0,35 |
| То же, с аппаратами АТС | » | 0,016 | 1,29 | 0,35 |
| То же, с аппаратами МБ | » | 0,016 | 0,58 | 0,35 |
| Кабельная линия внутриобъектной связи подземная, настенная | 1 км | — | — | 1,5 |
| | 1 км-пара | 0,117 | 0,08 | — |
| То же, подвесная | 1 км | — | — | 3 |
| Кабельная канализация | канал, | — | — | 7 |
| | кан-км | 4,35 | — | — |
| Кабельная линия внешней связи | 1 км, | — | — | 6 |
| | 1 км-пара | 0,167 | 0,16 | — |
| Распорядительная станция диспетчерской связи | 1 станция | 22 | 22 | 22 |
| Промежуточный пункт | пункт | 1,167 | 1,16 | 0,7 |
| Телефонная симплексная трансляция | трансляция | 12 | 11 | 11 |

чество приборов или систем; $\eta$ — коэффициент полезного действия выпрямителей; $\rho$ стоимость 1 кВт·ч местной электроэнергии, руб. Коэффициент полезного действия выпрямителей, как правило, находится в пределах 0,6÷0,75. Стоимость 1 кВт.ч местной электроэнергии колеблется от 0,0071 (Армэнэнерго) до 0,056 руб. (Латвэнерго).

Годовые затраты на оплату электроэнергии на телефонных станциях могут быть подсчитаны по формуле:

$$Э_{этс} = \frac{I_{чнн} U}{к_{чнн} \eta} \frac{365p}{1000}, \text{ руб.},$$

где $I_{чнн}$ — величина тока, потребляемого станцией в чнн, А; $U$ — напряжение батареи, В; $к_{чнн}$ — коэффициент концентрации нагрузки.

На основе опытных данных установлены средние сроки службы по каждому из видов сооружений и устройств производственной связи. Являясь основными средствами, находящимися на балансе и обслуживании служб связи промышленных предприятий и строек, сооружения и устройства в процессе работы утрачивают свою первоначальную стоимость, что учитывается соответствующими отчислениями в эксплуатационных расходах, которые получили название

Таблица 5.2

ЦЕНА МАТЕРИАЛОВ НА ТЕКУЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

| Наименование устройств связи | Единица измерения | Цена руб. в год |
|---|---|---|
| Воздушные междугородные линии связи | 1 км | 31,0 |
| Центральные телефонные станции: | | |
| ручные | 1000 номеров | 332,4 |
| автоматические | » | 418,0 |
| Воздушные и кабельные сети местной телефонной связи | 100 телефонных аппаратов | 226,0 |
| Абонентские пункты | » | 52,0 |
| Аппаратура многоканальной телефонной связи и линейно-аппаратных цехов | 1 стойка | 67,0 |
| Аппаратура избирательной телефонной связи | 100 км связи | 41,0 |
| Радиостанция | 1 радиостанция | 10,0 |
| Радиоприемник | 1 приемник | 0,5 |
| Трансляционные узлы и сети | 100 трансляционных точек | 9,0 |
| Радиорелейная аппаратура (без радиоламп) | 1 комплект аппаратуры одного ствола | 43,0 |
| Стационарные аккумуляторы (при емкости большей, чем СК-1, стоимость материалов пропорционально увеличивается) | 1 аккумулятор СК-1 | 0,1 |
| Стартстопные аппараты всех систем | 1 аппарат | 2,0 |

амортизационных отчислений. Эти отчисления поступают в амортизационный фонд, предназначенный для возобновления полностью износившихся основных средств за время их службы. Одна часть этого фонда направляется на финансирование капитальных вложений по возобновлению основных средств, а другая — на частичное возмещение износа этих средств в виде периодических затрат на плановые капитальные ремонты. Сумма амортизационного фонда зависит от первоначальной стоимости основных средств и нормы амортизационных отчислений, устанавливаемой в размере, соответствующем износу этих средств.

К прочим производственным и транспортным расходам относятся: абонентская плата за пользование соединительными линиями и телефонными аппаратами, имеющими выход на телефонные станции министерства связи; расходы на регистрацию радиостанций; арендная плата за телефонную канализацию, услуги, оплачиваемые по счетам других организаций. Обычно прочие производственные и транспортные расходы не превышают 7% от расчетного фонда заработной платы.

Общие расходы по управлению и обслуживанию производства включают в себя затраты вспомогательного характера, которые непосредственно не относятся к текущему содержанию и эксплуатации устройств производственной связи, но вызываются общей производственной деятельностью службы связи, а именно содержанием административно-управленческого штата, младшего обслуживающего персонала (МОП), автотранспорта, помещений, инвентаря и т. д. Эти виды расходов принимают в размере 10% от всех основных эксплуатационных расходов (зарплата, материалы и запчасти, электроэнергия, амортизационные отчисления и прочие расходы).

## 5.4. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ФУНКЦИЙ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Выше уже указывалось, что величина капитальных затрат определяется по сметам к техническим или техно-рабочим проектам. Сметы на капитальное строительство составляются на основе объемов работ по каждому проекту. Вследствие этого стоимости объектов, имеющих один и тот же перечень работ (например, ПАТС одной и той же системы и емкости в приспосабливаемом помещении в одном географическом пункте), с точностью до величины непредвиденных расходов (10%) совпадают между собой. Так как существует большое (но конечное) число возможных объемов выполнения строительно-монтажных работ по созданию тех или иных сетей производственной связи, то может рассматриваться конечное множество дискретных величин стоимостей строительства. Использование указанного множества дискретных величин стоимостей строительства той или иной сети производственной связи обеспечивает получение максимально возможной на этапе проектирования точности, поскольку каждому конкретному объему работ поставлена в соответствие рассчитанная по всем сметным нормам и правилам стоимость. Однако в этих случаях невозможно выбрать оптимальный вариант организации связи каким-либо иным путем, кроме составления сметных стоимостей. Совершенно ясно, что для решения большого круга задач такой путь совершенно непригоден, так как составление каждой сметы требует значительных трудозатрат, выполняемых в основном вручную. Составление смет при сравнении нескольких вариантов организации связи со сложным перечнем работ может оказаться дороже стоимости технологической и других частей проекта и занять время, отведенное для разработки всего проекта.

Для анализа сравниваемых вариантов, не прибегая к помощи сметчиков, можно представить капитальные затраты как функцию основных характеристик объемов выполняемых работ. В данном случае предполагается, что указанные характеристики могут принимать любые значения, вследствие чего и стоимость становится

не дискретной, а непрерывной величиной. Естественно, что при этом уменьшается точность расчетов, как всегда бывает, когда ступенчатая функция заменяется плавной кривой. Кроме того, точность уменьшается и в результате замены всего перечня объема работ только основными (1—2) ее характеристиками.

Использование функций капитальных затрат от основных характеристик объемов выполняемых работ позволяет намного ускорить процесс принятия оптимального проектного решения, упростить этот процесс, хотя точность расчетов при этом меньше, чем при составлении смет. Функции капитальных затрат получаются с помощью аппарата регрессионного и корреляционного анализа, подробно описанного в разд. 2.3. Типовые процедуры представления капитальных затрат в виде функции следующие. Для рассматриваемой сети производственной связи выбирается 1—2 показателя объема работ, которые наиболее полно характеризуют стоимость строительства данной сети (например, тип и емкость ПАТС для сети производственной автоматической телефонной связи, емкость коммутатора для сети диспетчерской телефонной связи и т. д.). Далее по сметам проектов, выпущенных различными институтами, выбирается характеристика объема работ ($x_i$), соответствующая ее стоимости ($y_i$). Чем больше объем такой выборки, тем точнее будет получен результат. На основе характера изменения величин $x_i$ и $y_i$ подбирается линия регрессии. Ниже в основном используются линейная и квадратичная линии регрессии, т. е. функции вида $y=a_0+a_1x$ и $y=a_0+a_1x+a_2x^2$. Если добиваться сближения ступенчатой и аппроксимирующей функций, применяя в качестве последней полиномы, то, как уже указывалось в гл. 2, совпадение этих функций будет тем лучше, чем выше степень полинома. С другой стороны, чем меньше будет степень аппроксимирующего полинома, тем легче его использовать для решения практических задач. Поэтому регрессионный анализ начинают с наиболее простых видов функций и путем постепенного их усложнения добиваются требуемой точности аппроксимации.

На основе регрессионного анализа проводится корреляционный анализ. Чем ближе величина коэффициента корреляции или корреляционного отношения к единице, тем удачнее были выбраны характеристики объема строительно-монтажных работ и линии регрессии. Ниже принято, что при величине коэффициента корреляции и корреляционного отношения менее 0,5 указанный выбор осуществлен неправильно и следует ввести в рассмотрение дополнительные или взять другие характеристики объемов строительно-монтажных работ и линии регрессии. Если коэффициент корреляции или корреляционное отношение больше 0,5, но меньше 0,7, аппроксимация может быть признана приемлемой в целом, как указывающая характер взаимосвязи между аргументом (характеристикой объема работ) и функцией (стоимостью строительно-монтажных работ). Однако пользоваться количественными оценками такой функции следует с особой осторожностью ввиду их малой надеж-

ности. При величине коэффициента корреляции или корреляционного отношения выше 0,7 аппроксимация может быть признана удовлетворительной, и чем ближе эти величины к единице, тем лучше получен результат [1]). Однако даже при величинах коэффициента корреляции и корреляционного отношения, равных 0,999, нельзя быть полностью уверенным в приемлемости полученного результата для всех случаев, которые могут встретиться на практике. При хорошем совпадении результатов, полученных по ступенчатой и аппроксимирующей функциям, для отдельно взятых точек отклонения могут превышать величину, принятую нами за допустимую границу точности для выражения общей стоимости. Поэтому в качестве критериев выбора линии регрессии зависимости стоимости строительства сети производственной связи от характеристик объема строительства используются коэффициент корреляции (корреляционное отношение) и относительная разница между значениями аппроксимируемой и аппроксимирующей функциями, выраженная в процентах. Эта разница представляет собой точность аппроксимации функции общей стоимости строительства $P_c$

$$P_c = \frac{\hat{C}_i - C_i}{\hat{C}_i} 100, \qquad (5.7)$$

где $C_i$ — значение функции капитальных затрат при $i$-м объеме строительства, подсчитанное по аппроксимирующей формуле, тыс. руб.; $\hat{C}_i$ — среднее значение величины стоимости при $i$-м объеме строительства по данным исходной статистики, тыс. руб.

Требуемая величина точности функции капитальных затрат зависит от целей проводимой аппроксимации. Если она выполняется для оценки величины требуемых капитальных затрат при том или ином объеме строительства, вполне удовлетворительной может быть признана функция, позволяющая спрямить «ступенчатые» исходные данные так, чтобы максимальное отклонение между ними не превышало 10%, что равно величине непредвиденных расходов при составлении смет к техническим проектам. В тех случаях, когда функция капитальных затрат применяется для включения в выражение приведенных затрат (см. гл. 7), требования на точность аппроксимации накладываются приведенными затратами.

Обозначим точность аппроксимации приведенных затрат через $P_п$. По определению

$$P_п = \frac{\hat{П}_i - П_i}{\hat{П}_i} 100, \qquad (5.8)$$

где $П_i$ и $\hat{П}_i$ — значения функции приведенных затрат, вычисленные по аппроксимирующей формуле и по исходной статистике.

[1]) Для оценки полученных величин коэффициентов корреляции и корреляционных отношений можно пользоваться распределением Фишера (см. стр. 73).

Введем также точность аппроксимации эксплуатационных расходов $P_э$:

$$P_э = \frac{\hat{Э}_i - Э_i}{Э_i} 100, \qquad (5.9)$$

где $Э_i$ и $\hat{Э}_i$ — значения функции эксплуатационных расходов при $i$-м объеме строительно-монтажных работ, вычисленные соответственно по аппроксимирующей формуле и по исходной статистике.

Используя выражение (5.3'), на основе (5.8) получаем

$$P_п = \frac{\Delta Э_i + E_н \Delta C_i}{П_i} 100,$$

где $\Delta Э_i$ и $\Delta C_i$ соответственно отклонения между аппроксимирующими и фактическими значениями функции, которые на основе (5.7) и (5.9) могут быть представлены в виде:

$$\Delta Э_i = \frac{P_э}{100} Э_i; \quad \Delta C_i = \frac{P_с}{100} C_i.$$

После подстановки получим выражение, связывающее точность функции приведенных затрат с точностью функций эксплуатационных расходов и капитальных затрат:

$$P_п = \frac{P_э Э_i + E_н P_с C_i}{П_i}. \qquad (5.10)$$

Из ф-лы (5.10) следует, что результирующая точность аппроксимации (точность функции приведенных затрат) является средневзвешенной величиной между величинами $P_э$ и $E_н P_с$. Поскольку $E_н < 1$, то ошибка аппроксимации функции капитальных затрат влияет на результирующую точность в значительно меньшей степени, чем на результаты определения самой величины капитальных затрат. Например, если $E_н = 0{,}15$, а $C_i/П_i = 0{,}7$, то точность аппроксимации функции капитальных затрат $P_с = 10\%$, как это следует из (5.10), оказывается эквивалентной точности аппроксимации функции приведенных затрат всего в 1,05%. При уменьшении доли капитальных затрат в общей величине приведенных затрат уменьшение значения величины $P_с$ будет продолжаться.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что для практических целей могут использоваться функции капитальных затрат, у которых max $P_с < 10\%$.

Очень часто представляет интерес определение не только общей стоимости строительства, но и составных ее частей. Из них наибольшее значение имеет стоимость оборудования, так как остальные составные части стоимости могут быть во многих случаях определены путем соответствующих на нее начислений. Естественно, что точность аппроксимации функции общей стоимости строительства существенно зависит от точности аппроксимации составных ее частей. Поэтому точность функции суммарных затрат должна быть

соответствующим образом распределена между составными ее частями. При этом важно учесть два обстоятельства:

1) стоимость строительных, монтажных работ, оборудования, приобретений, а также прочие затраты существенно отличаются между собой по величине для разных сетей производственной связи; для станционных работ основной удельный вес (до 80%) составляет стоимость оборудования, а для линейных работ (примерно в том же проценте) — строительные и монтажные работы; стоимость приобретений и прочие затраты во всех случаях малы по сравнению с общей величиной затрат;

2) ошибки аппроксимации, как правило, имеют разные знаки и при суммировании могут не только увеличить общую величину ошибки, но и уменьшить ее.

Вследствие этих обстоятельств было бы неправильным принятый предел точности для общей стоимости (10%) просто разделить на 5 составных частей равномерно (т. е. принять точность, равную 2%, для функции любой составной части общей стоимости). По аналогии с (5.10) точность аппроксимации суммарной функции можно представить как средневзвешенную величину, т. е.

$$P_c = \sum_{j=1}^{5} p_j \frac{C_j}{C}, \qquad (5.11)$$

где $C_j$ — величина затрат $j$-го вида: $\sum_{j=1}^{5} C_j = C$; $C$ — общая величина затрат; $p_j$ — точность аппроксимации функции капитальных затрат $j$-го вида.

Для приобретений и прочих затрат можно допустить меньшую точность аппроксимации (до 30%), потому что даже значительные ошибки в подсчете этих видов затрат мало сказываются на величину общей стоимости. Указанная величина точности (30%) соответствует точности не выше 1,5% для функции общей стоимости.

Для определения функции стоимости оборудования для всех сетей производственной связи (кроме сети линейных сооружений) желательно получить точность порядка 5%, что, как правило, позволяет обеспечить выполнение требования по допустимой точности аппроксимации функции общих затрат. Однако иногда такой точности добиться просто невозможно. Поэтому в ряде случаев идут на то, что указанную величину точности (5%) распространяют не на всю функцию стоимости оборудования, а на 70—80% от числа возможных (встречаемых в практических ситуациях) дискретных значений аргумента функции. Для остальных 20—30% возможных значений функции допускается точность 10% и даже 15—20%. На сетях линейных сооружений стоимость оборудования мала и может определяться с точностью 10—20%.

Для определения функций стоимости строительных и монтажных работ для всех сетей производственной связи (кроме сети линейных сооружений) допускается точность аппроксимации порядка

10—15%. Это соответствует точности функции общих затрат 2 3%. Для сети линейных сооружений функции стоимости строительных и монтажных работ должны обеспечивать точность 10%.

Выше указывалось, что функция общей стоимости строительства может быть получена путем применения регрессионного и корреляционного анализов к множеству статистических значений этой функции, выбранных из проектов специализированных проектных организаций. Аналогичное положение имеет место и для всех составных частей общей стоимости. Однако для нахождения функции стоимости оборудования от его основных характеристик имеется и другой путь, рассматриваемый в последующих разделах. Данная функция (с точностью до коэффициентов транспортных расходов и стоимости тары) может быть получена на основе анализа действующих цен и характеристик этого оборудования.

Функции эксплуатационных расходов (общая и ее составные части) так же, как и функции капитальных затрат, образуются на основе регрессионного и корреляционного анализов статистического материала (сметные калькуляции, входящие в состав проектов, или отчеты служб эксплуатации средств связи на промышленных предприятиях). На эксплуатационные расходы, как правило, влияет значительно большее количество факторов, чем на капитальные затраты, когда, как указывалось выше, можно обойтись с достаточной степенью точности 1 2 показателями, характеризующими объем работ. Поэтому для получения функции эксплуатационных расходов наиболее эффективно применение множественной корреляции. Приведенные в последующих разделах функции получены при использовании парной корреляции для исследования зависимостей общей величины эксплуатационных расходов и ее составных частей от различных факторов — численности службы эксплуатации, ее структуры, мощности промышленного предприятия и т. д. Точность полученных при этом зависимостей, как правило, мала.

Из ф-лы (5.10) вытекает, что результирующая точность (точность функции приведенных затрат) пропорциональна удельному весу эксплуатационных расходов в общей величине приведенных затрат. Если удельный вес мал (меньше 0,3), допустимая величина $P_э$ должна быть меньше 10%. При увеличении удельного веса величина $P_э$ должна уменьшаться. Если $P_э > 10\%$, то на ее основе можно делать выводы только о тенденции ее изменения в зависимости от интересующих нас параметров, но область применения числовых характеристик этих зависимостей весьма ограничена.

## 5.5. КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ

В настоящее время на промышленных предприятиях и в строительстве используются две системы автоматических телефонных станций: декадно-шаговые (УАТС-50/100, АТС-100/500 М, УАТС-49,

АТС-47, ГАТС-54) и координатные (АТС К-40/80, АТС К-50/200, АТС К-100/2000, АТСК, «Протресс», УПАТС-100/400). Построение сети линейных сооружений практически не зависит от применяемой системы станционного оборудования. Основные технические данные указанных станций приведены в табл. 5.3. Некоторые параметры (допустимое сопротивление шлейфа, допустимые пределы колебания напряжения) не зависят от емкости станции и для некоторых типов АТС одинаковы. Эти параметры не определяют объема оборудования станции и, следовательно, ее стоимости. Количество соединительных линий и требуемая площадь являются функциями емкости и системы АТС. Однако и эти параметры не могут характеризовать стоимость оборудования АТС.

В табл. 5.4 приведена цена оборудования АТС различных систем. Из табл. 5.4 следует, что для каждого типа станции параметром, определяющим ее стоимость, является номерная емкость. Остальные характеристики АТС (допустимые величины сопротивлений абонентских и соединительных линий, количество соединительных линий и т. д.) хотя и влияют на стоимость станции, но не определяют ее, о чем свидетельствуют близкие к нулю величины коэффициента корреляции. Иначе говоря, эти факторы являются несущественными. С другой стороны, совокупность именно этих, несущественных факторов, определяет тип станции, который играет решающую роль в установлении ее стоимости. Таким образом, стоимость оборудования автоматических телефонных станций определяют два фактора — тип станции и ее емкость.

Для каждого типа станции, используя данные гл. 2, можно получить линии регрессии, связывающие цену и емкость. Рассмотрение полученных результатов показывает, что линии регрессии вида $y=a+b/x$ и $y=a+b\lg x$ имеют более низкие величины корреляционных отношений и дают более значительные отклонения от статистических данных чем полиномы $y=a+bx$; $y=a+bx+cx^2$ и $y=a+bx+cx^2+dx^3$, где под $y$ подразумевается цена оборудования, а под $x$ — емкость станции. Произведенные на ЭВМ расчеты коэффициентов корреляции и корреляционных отношений (табл. 5.5) показали, что для полиномов они выше 0,95. Следовательно, зависимости в виде полиномов с очень большой вероятностью являются функциональными. При этом чем выше степень аппроксимирующего полинома, тем выше величина корреляционного отношения и тем меньше отклонения между фактическими данными и результатами расчета по формулам линий регрессии.

Следует отметить, что станции типа УАТС-50/100 и АТС К-40/800 имеют не более двух значений емкостей, и поэтому зависимость цены оборудования от емкости станций отражается прямой линией с коэффициентом корреляции, равным 1. Уравнение этой линии имеет вид

$$C_0 = b_0 + b_1 N, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.12)$$

где $N$ — емкость станции, выраженная в сотнях номеров.

Таблица 5.3

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТЕЛЕФОННЫХ СТАНЦИЙ

| Тип и модификация станции | Емкость номеров | | | Допустимое сопротивление шлейфа, Ом | | Количество соединительных линий | Допустимые пределы колебания напряжения, В | Требуемая площадь, м² | Постоянное присутствие обслуживающего персонала |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | минимальная | максимальная | максимальная при введении дополнительных стативов СВУ (ОС) и дооборудовании станции | абонентской линии | соединительной линии | | | | |
| Учрежденческие (оконечные и узловые) УАТС-50/100 | 50 | 94 | — | 1 000 | В зависимости от типа встречной станции | 9 или 13 | 58÷64 | 10 | — |
| Оконечные, узловые, центральные АТС-100/500 М | 100 | 500 | — | 1 000 | 1 500 | По величине нагрузки | 58÷64 | В зависимости от емкости станции | Требуется |
| Учрежденческие УАТС-49 | 100 | 900 | 2 000 | 1 000 | 1 500 | То же | 58÷64 | То же | То же |
| Городские АТС-47 | 100 | 10 000 | — | 1 000 | 1 500 | « | 58÷64 | « | » |
| Городские ГАТС-54 | 100 | 10 000 | — | 1 500 | 2 000 | « | 58÷64 | « | » |
| Сельские оконечные и узловые АТСК-40/80 | 40 | 80 | — | 1 000 | 1 500 | 5 или 8 | 54÷72 | 9 | Не требуется |
| То же, АТС К-50/200 | 50 | 200 | — | 1 200 | 1 400 | Оконечная — 13, Узловая — 49 | 54÷72 | 12 | То же |

*Продолжение*

| Тип и модификация станции | Емкость номеров | | | Допустимое сопротивление шлейфа, Ом | | Количество соединительных линий | Допустимые пределы колебания напряжения, В | Требуемая площадь, м² | Постоянное присутствие обслуживающего персонала |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | минимальная | максимальная | максимальная при введении дополнительных стативов СВУ (ОС) и дооборудовании станции | абонентской линии | соединительной линии | | | | |
| Учрежденческие и сельские (оконечные, узловые, центральные) | | | | | | По величине нагрузки | 54÷72 | В зависимости от емкости станции | » |
| АТС К-100/2000 | 100 | 2 000 | 10 000 | 1 200 | 2000 | | | | |
| Городские АТСК | Не ограничивается | | | 1 000 | 3 000 | По величине нагрузки | 58÷66 | В зависимости от емкости станции | Требуется |
| Учрежденческо-производственные УПАТС-100/400 | 100 | 400 | — | 1 000 | 3 000 | До 200 №№ 10 (2 с МТС) 300 и 400 №№ 2 (4 с МОТС) | 58÷66 | 27,5 | Не требуется |

Таблица 5.4

ЦЕНА ОБОРУДОВАНИЯ АТС В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПОВ И ЕМКОСТИ СТАНЦИЙ

| Тип и модификация станции | Цена, руб., при емкости станций | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| Учрежденческая УАТС-50/100 | — | 1 970 | — | 3 298 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сельская узловая УАТС-50/100 | — | 3 526 | 4 632 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сельская АТС-100/500М: | | | | | | | | | | | | | |
| — оконечная | — | — | — | 6 566 | — | 11 027 | 17 038 | 21 808 | 25 417 | — | — | — | — |
| — узловая | — | — | — | 6 907 | — | 11 150 | 17 161 | 21 994 | 25 603 | — | — | — | — |
| — центральная | — | — | — | 7 816 | — | 12 744 | 19 041 | 24 173 | 27 239 | — | — | — | — |
| Учрежденческая УАТС-49 | — | — | — | 1 817 | — | 3 189 | 653 | 5 715 | 7 080 | 8 407 | 9 504 | 10 893 | 12 005 |
| Сельская АТС К-40/80: | | | | | | | | | | | | | |
| — оконечная | 2 888 | — | 4 954 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — узловая | 6 705 | — | 9 478 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сельская АТС К-50/200: | | | | | | | | | | | | | |
| — оконечная | — | 4 234 | — | 7 277 | 11 174 | 14 711 | — | — | — | — | — | — | — |
| — узловая | — | — | — | 14 020 | 19 814 | 24 198 | — | — | — | — | — | — | — |
| Учрежденческая АТС К-100/2000 | — | — | — | 9 645 | — | 17 639 | 23 446 | 31 175 | 37 095 | 44 441 | 49 976 | 54 252 | 61 649 |
| Сельская АТС К-100/2000: | | | | | | | | | | | | | |
| — оконечная | — | — | — | 11 012 | — | 17 186 | 25 207 | 31 659 | — | — | — | — | — |
| — узловая | — | — | — | 15 405 | — | 26 448 | 31 369 | 42 761 | 48 768 | — | — | — | — |
| — центральная | — | — | — | — | — | — | 30 246 | 42 444 | 54 756 | 62 049 | 73 446 | 80 274 | — |

Таблица 5.5

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЦЕНЫ ОТ ЕМКОСТИ ПАТС РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

| Тип станций | Степень аппроксимирующего полинома | Коэффициенты линий регрессии (5.12) и (5.13) | | | Коэффициент корреляции или корреляционное отношение |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | |
| УАТС-50/100: | | | | | |
| — учрежденческая | 1 | 0,64 | 2,66 | — | 1 |
| — сельская узловая | 1 | 1,68 | 3,68 | — | 1 |
| Сельская АТСК-40/80: | | | | | |
| — оконечная | 1 | 0,82 | 5.16 | | 1 |
| — узловая | 1 | 3,93 | 6,93 | — | 1 |
| Сельская АТС-100/500М: | | | | | |
| — оконечная | 1 | 1,83 | 4,85 | — | 0,997 |
| | 2 | 0,35 | 6,11 | —0,21 | 0,998 |
| — узловая | 1 | 3,3 | 5,16 | — | 0,995 |
| | 2 | 1,32 | 6,86 | —0,28 | 0,997 |
| Сельская центральная АТС-100/500 М | 1 | 2,52 | 6,22 | — | 0,950 |
| | 2 | 1,4 | 9,58 | —0,56 | 0,955 |
| Учрежденческая УАТС-49 | 1 | 0,67 | 1,27 | — | 0,999 |
| | 2 | 0,49 | 1,37 | 0,01 | 0,999 |
| Сельская АТСК-50/200: | | | | | |
| — оконечная | 1 | 0,52 | 7,07 | — | 0,999 |
| | 2 | 1,13 | 5,83 | 0,49 | 0,999 |
| узловая | 1 | 4,93 | 9,67 | — | 0,998 |
| | 2 | 5,41 | 8,71 | 0,38 | 0,998 |
| АТСК-100/2000: | | | | | |
| учрежденческая | 1 | 4,57 | 6,4 | — | 0,998 |
| | 2 | 2,29 | 7,65 | —0,12 | 0,999 |
| — сельская оконечная | 1 | 3,77 | 7,0 | — | 0,998 |
| | 2 | 4,12 | 6,65 | 0,07 | 0,999 |
| сельская узловая | 1 | 8,04 | 8,3 | — | 0,993 |
| | 2 | 6,24 | 9,85 | —0,26 | 0,994 |
| — сельская центральная | 1 | 2,13 | 10,01 | - | 0,996 |
| | 2 | —12,76 | 16,0 | —0,55 | 0,999 |

Для всех АТС (кроме УАТС-50/100 и АТС К-40/80) в результате расчетов получены зависимости цены от емкости станции, коэффициенты корреляции и корреляционные отношения которых меньше единицы. Следовательно, при расчете по этим уравнениям по-

лучаются отклонения от фактических цен оборудования, рассматриваемые как случайные величины. Для возможности использования полученных зависимостей в теоретических исследованиях, а также при решении некоторых задач проектирования сетей, должна быть проведена оценка указанных отклонений с целью определения ряда общих закономерностей. Такая оценка производится известными методами математической статистики и корреляционного анализа. В частности, она может позволить определить в достаточно общем виде степень влияния отклонений между аппроксимирующей и статистической функциями на конечные результаты при выборе типа оборудования, расчете величины капитальных вложений и т. д.

Коэффициенты зависимостей вида (5.12) и квадратичной зависимости цены от емкости различных типов станций вида

$$C_0 = b_0 + b_1 N + b_2 N^2, \text{ тыс. руб.}, \qquad (5.13)$$

полученные в результате расчетов на ЭВМ, приведены в табл. 5.5. На рис. 5.1 даны зависимости цены от емкости ПАТС в виде (5.12).

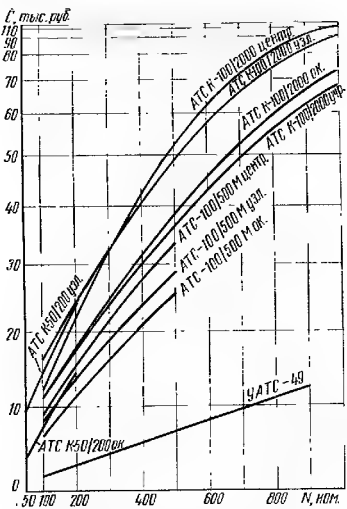



Рис. 5.1. Зависимость цены от емкости автоматических телефонных станций (линейная форма зависимости)

В табл. 5.6 приводятся основные количественные характеристики функций цены оборудования АТС рассматриваемых типов. Из таблицы следует, что наиболее дешевым является оборудование УАТС-49, декадно-шаговые станции, как правило, дешевле координатных. Среднее квадратическое отклонение цены от математического ожидания $\sigma$ достигает почти половины величины математического ожидания $C_0$, о чем свидетельствуют и высокие значения коэффициента вариации ($v = 30—46{,}7\%$). Большая величина дисперсии $\sigma^2$ и среднего квадратического отклонения объясняется тем, что рассматриваемая корреляционная зависимость достаточно резко изменяется с увеличением аргумента (емкости станции).

Таблица 5.6

ОСНОВНЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ ЦЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ АТС

| Тип станции | Математическое ожидание $C_0$, тыс. руб. | Дисперсия $\sigma^2$ тыс. руб. | Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ тыс. руб. | Коэффициент вариации $v$ | Коэффициент асимметрии $\mathfrak{A}$ | Эксцесс $\varepsilon$ | Коэффициент корреляции $r$ | Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции $\sigma_r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сельские АТС-100/500М: | | | | | | | | |
| — оконечные | 16,4 | 47,3 | 6,9 | 42,0 | —0,119 | —1,42 | 0,996 | 0,002 |
| — узловые | 18,8 | 53,8 | 7,3 | 39,0 | —0,164 | —1,25 | 0 995 | 0,004 |
| — центральные | 21,2 | 85,7 | 9,2 | 43,7 | 0,027 | —1,58 | 0,95 | 0,043 |
| УАТС-49 | 7,0 | 10,8 | 3,3 | 46,7 | —0,047 | —1,21 | 0,999 | 0,000 |
| Сельские АТС К-50/200: | | | | | | | | |
| — оконечные | 9,3 | 15,6 | 3,9 | 42,2 | 0,070 | —1,42 | 0,998 | 0,001 |
| — узловые | 17,0 | 29,3 | 5,4 | 31,8 | 0,037 | —1,49 | 0,998 | 0,002 |
| Учрежденческие АТС К-100/200 | 36,6 | 274,3 | 16,6 | 45,2 | —0,114 | —1,20 | 0,998 | 0,001 |
| Сельские АТС К-100/2000: | | | | | | | | |
| оконечные | 21,3 | 61,3 | 7,8 | 36,8 | —0,019 | —1,45 | 0,999 | 0,001 |
| — узловые | 32,9 | 139,8 | 11,8 | 35,8 | —0,094 | —1,28 | 0,993 | 0,006 |
| — центральные | 57,2 | 295,0 | 17,2 | 30,0 | —0,201 | —1,22 | 0,995 | 0,003 |

Коэффициент ассиметрии $\alpha$ имеет очень малую величину, что свидетельствует о том, что случайные величины отклонений фактических данных от результатов расчета по формулам линий регрессии распределены почти симметрично. При $\alpha>0$ наклон функции более пологий слева от математического ожидания случайной величины отклонения; при $\alpha<0$ наклон функции более пологий справа. Наличие эксцесса $\varepsilon$ указывает на несоответствие закона распределения случайных величин отклонения данных от полученных зависимостей нормальному закону. Так как для всех станций $\varepsilon<0$, то случайная величина отклонений между фактическими данными и корреляционной функцией имеет распределение более пологое, чем нормальное.

Выше указывалось, что коэффициент корреляции не может полностью характеризовать качество проведенной аппроксимации, так как необходимо учитывать точность совпадения линии регрессии с фактическими данными по всем точкам возможных значений аргумента (в данном случае — емкости станций). В табл. 5.7 прове-

Таблица 5.7

ЛИНЕЙНАЯ, КВАДРАТИЧНАЯ И КУБИЧЕСКАЯ ФОРМЫ ЗАВИСИМОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ УАТС-49 ОТ ЕМКОСТИ СТАНЦИИ

| Емкость станции, номера | Цена оборудования по прейскуранту руб. | Цена оборудования, подсчитанная по формулам при зависимостях руб. | | | Отклонения от фактической цены, %, при зависимостях | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | линейной | квадратичной | кубической | линейной | квадратичной | кубической |
| 100 | 1817 | 1945 | 1851 | 1830 | 6,85 | 1,87 | 0,72 |
| 200 | 3189 | 3216 | 3192 | 3201 | 0,84 | 0,09 | 0,38 |
| 300 | 4653 | 4487 | 4514 | 4532 | 3,55 | 3,00 | 2,60 |
| 400 | 5715 | 5758 | 5815 | 5828 | 0,75 | 1,75 | 1,97 |
| 500 | 7080 | 7029 | 7096 | 7097 | 0,72 | 0,23 | 0,24 |
| 600 | 8407 | 8300 | 8357 | 8345 | 1,27 | 0,59 | 0,73 |
| 700 | 9504 | 9571 | 9598 | 9580 | 0,71 | 0,99 | 0,80 |
| 800 | 10893 | 10842 | 10818 | 10809 | 0,46 | 0,69 | 0,775 |
| 900 | 12005 | 12113 | 12018 | 12105 | 0,90 | 0,11 | 0,83 |

дено сравнение стоимости оборудования УАТС-49 при различных формах зависимости ее стоимости от емкости станции. Из таблицы следует, что при рассмотрении отдельных точек квадратичная форма зависимости дает несколько лучшие совпадения с фактическими данными, чем линейная и кубическая формы. Однако любые формы зависимости, как следует из табл. 5.7, обеспечивают точность использования аппроксимирующих формул менее 7% для всех возможных значений аргумента, менее 3% — для всех возможных значений аргумента при квадратичной и кубической формах зависимости и менее 1% — для 70% значений аргумента.

Таблица 5.8

ДАННЫЕ О ВЕЛИЧИНАХ ГОДОВЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ И СТРУКТУРЕ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ ПО РЯДУ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

| Характеристика предприятия | | Характеристики сетей и устройств связи | | | | | | | | | | Численность трудящихся в службе связи, чел. | | | | | Годовые эксплуатационные расходы службы связи тыс., руб. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Прямая телефонная связь | | Линейные сооружения | | | Громкоговорящая связь | | | | В том числе | | | | |
| Объем выпускаемой продукции, млн. т. | Численность трудящихся тыс. чел. | Количество средств связи тыс. условных технических единиц | Емкость ГАТС (монтированная), тыс. номеров | емкость, номеров | кол-во установок | канализация кан км | протяженность кабелей, км (в числителе воздушных, в знаменателе физических) | Кол-во радиостанций | кол-во центральных усилителей | мощность центральных усилителей, кВ·А | кол-во аппаратов ПГС | Всего | ИТР | служащих | рабочих | младший обслуживающий персонал | |
| 9,0 | 61,4 | 40,0 | 9,3 | 3500 | — | 335,9 | 940/470 | 212 | 98 | 18,7 | 283 | 347 | 32 | 51 | 258 | 8 | 1097,2 |
| — | 18,0 | 25,5 | 3,3 | 1900 | 50 | 175,0 | 135/140 | 96 | 31 | 14,9 | 11 | 202 | 32 | 22 | 145 | 3 | 646,1 |
| — | 31,7 | 24,5 | 4,4 | 2350 | 60 | 40,1 | 310/70 | 111 | 29 | 14,2 | 354 | 157 | 25 | 8 | 120 | 4 | 530,1 |
| — | 33,5 | 21,4 | 4,0 | 3000 | 91 | 197,7 | 650/220 | 87 | 42 | — | 294 | 170 | 19 | 27 | 117 | 7 | 437,1 |
| 3,85 | 33,8 | 15,9 | 5,0 | 1500 | 34 | — | —/120 | 92 | 38 | — | 102 | 129 | 18 | 33 | 75 | 3 | 331,8 |
| — | 23,2 | 15,1 | 3,3 | 1400 | 40 | 374 | 400/130 | 30 | 9 | 3,4 | 359 | — | — | — | — | — | 511,8 |
| — | — | 15,0 | 7,9 | .. | 58 | 173,6 | 235/210 | 55 | 25 | — | 366 | — | — | — | — | — | 442,1 |
| — | — | 14,0 | 3,0 | 1200 | 47 | 31,4 | 180/130 | 67 | 34 | 3,7 | 122 | 163 | 11 | 30 | 111 | 9 | — |
| 3,0 | — | 13,3 | 3,4 | 1100 | 38 | 31,0 | 130/160 | 65 | 33 | 7,0 | — | — | — | — | — | — | 233,0 |
| 1,3 | — | 6,9 | 2,0 | 350 | 7 | 64,9 | 53/32 | — | 2 | 0,2 | 106 | 24 | 3 | 2 | 19 | — | — |
| — | 19,4 | 3,9 | 1,0 | 200 | 42 | — | 31/36 | 6 | 10 | 1,5 | 80 | — | — | — | — | | 103,5 |
| 1,6 | 11,3 | 3,0 | 1,2 | 400 | 29 | 8,21 | 28/27 | 6 | 5 | 2,0 | — | — | — | — | — | — | 70,6 |
| — | 5,5 | 2,4 | 0,6 | 350 | 11 | 3,0 | 10/13 | — | 8 | 1,2 | — | — | — | — | — | — | 53,0 |
| — | 4,4 | 2,0 | 0,5 | 230 | 9 | 1,74 | 11/11 | 29 | — | — | 29 | — | — | — | — | — | 49,0 |
| 1,0 | 4,5 | 1,1 | 0,4 | 80 | 3 | 0,20 | 6/10 | — | 6 | 0,4 | 55 | — | — | — | — | — | — |

Точность аппроксимации для других типов станций выше, чем для УАТС-49, но для абсолютного большинства возможных значений аргумента она не превышает величины 5%, которая была установлена в разд. 5.4 как допустимый предел при подобного рода зависимостях.

Для исследования влияния емкости ПАТС на общую величину эксплуатационных расходов и величины затрат по отдельным ее составным частям также используется парная корреляция. Для этого была взята статистика, полученная в цехах технологической диспетчеризации (связи) различных предприятий черной металлургии (табл. 5.8 и 5.9). Результаты обработки этой статистики на

Таблица 5.9

ДАННЫЕ О СТРУКТУРЕ ГОДОВЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ НА ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ НА РЯДЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

| Величина годовых эксплуатационных расходов, тыс. руб. | Затраты, тыс. руб., на | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | основную зарплату | отчисления к основной зарплате | амортизационные отчисления | материалы и запасные части | прочие |
| 1116,6 | 264.8 | 87.2 | 483.3 | 163 | 117,3 |
| 610,9 | 255,8 | 21,7 | 296,2 | 14,2 | 23,0 |
| 603,1 | 294,8 | | 189,9 | 43,3 | 75,1 |
| 562,1 | 146 | 60,5 | 256,2 | 52,1 | 46,4 |
| 404,6 | 149,8 | 27,6 | 105 | 43,5 | 78,7 |
| 343,3 | 156 | 15,6 | 82 | 31,3 | 58,4 |
| 287 | 129 | 11 | 98 | 39 | 10 |
| 207,9 | 98,8 | 18,9 | 57,3 | 20,4 | 12,5 |
| 160,1 | 45,7 | 18,7 | 66,1 | 23,4 | 6,3 |
| 116,3 | 47 | 3 | 44 | 10,1 | 12,2 |
| 90,9 | 53,9 | 3,4 | 19,5 | 4,0 | 10,1 |
| 79,7 | 32,3 | 4,2 | 24,2 | 19,0 | |

ЭВМ изложены в последующих разделах. Таким же образом можно получить аналогичные зависимости и для других отраслей народного хозяйства и строительства.

В табл. 5.10 приводятся данные корреляционных зависимостей эксплуатационных расходов от емкости ПАТС вида:

$$Э = a_0 + a_1 N, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.14)$$

и

$$Э = a_0 + a_1 N + a_2 N^2, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.15)$$

В этих формулах емкость $N$ выражена в сотнях номеров; $a_0$, $a_1$, $a_2$ — коэффициенты линий регрессии.

Таблица 5.10

ДАННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ЧИСЛЕННОСТИ ТРУДЯЩИХСЯ СЛУЖБЫ СВЯЗИ, ЧЕЛ., ОТ ЕМКОСТИ ПАТС

| Аппроксимирующая функция | Коэффициент корреляции или корреляционное отношение | Средние ошибки аппроксимации % |
|---|---|---|
| $Э = 37,1 + 9,22N$ | 0,83 | 50 |
| $Э = 19,4 + 10,4N - 0,013N^2$ | 0,83 | 43 |
| $э_2 = 25,7 + 2,63N + 0,006N^2$ | 0,59 | 77 |
| $э_3 = -135 + 13,4N - 0,18N^2$ | 0,87 | 71 |
| $э_4 = 25,3 - 4,3N + 0,18N^2$ | 0,96 | 10 |
| $э_5 = 252 - 19,1N + 0,37N^2$ | 0,99 | 1,8 |
| $R = 605 - 17,1N + 0,15N^2$ | 0,99 | 2,9 |
| $R_{итр} = 85,4 - 2,24N + 0,018N^2$ | 0,88 | 9,6 |
| $R_{служ} = 23,6 - 0,31N + 0,0065N^2$ | 0,84 | 78 |
| $R_{раб} = 490 - 14,4N + 0,13N^2$ | 0,98 | 8 |

В таблице обозначено: $Э$ — общая величина годовых эксплуатационных расходов, тыс. руб.; $э_2$ - годовые эксплуатационные расходы на заработную плату работникам службы связи, тыс. руб.; $э_2$ — амортизационные отчисления, тыс. руб.; $э_4$ — годовые затраты на материалы и запасные части, тыс. руб.; $э_5$ — прочие производственные затраты, тыс. руб.; $R$ - общая численность службы связи, чел.; $R_{итр}$ — численность инженерно-технических работников службы связи, чел.; $R_{служ}$ — численность служащих службы связи, чел.; $R_{раб}$ — численность рабочих службы связи, чел.; $N$ монтированная емкость ПАТС, сотен номеров.

На рис. 5.2 представлены зависимости общей величины эксплуатационных расходов и составных ее элементов от монтированной емкости ПАТС. Из рисунка видно, что затраты возрастают при увеличении монтированной емкости ПАТС. Однако не все составляющие эти затраты элементы ведут себя таким же образом. В частности, прочие затраты с увеличением монтированной емкости ПАТС убывают. Таким образом, зная емкость ПАТС, можно установить величину эксплуатационных расходов (в целом и по элементам), затрачиваемых на обслуживание всей системы производственной связи. Следовательно, эксплуатационные затраты на обслуживание ПАТС могут быть определены лишь косвенно, путем изучения влияния емкости ПАТС на изменение величины эксплуатационных расходов в целом по системе. Это объясняется тем, что ПАТС органически входят в состав системы производственной связи и выделить затраты, относящиеся только к обслуживанию этих станций, весьма затруднительно.

В табл. 5.10 приводятся также данные, показывающие зависимость численности трудящихся, занятых в службе связи промышленного предприятия, от емкости ПАТС. Как и зависимости эксплуатационных расходов, они имеют весьма высокие погрешности. Несмотря на большие ошибки аппроксимации, данные табл. 5.10 могут быть использованы для ориентировочного подсчета величин

эксплуатационных расходов и численности трудящихся, когда известен всего один параметр, характеризующий систему производственной связи — монтированная емкость ПАТС.

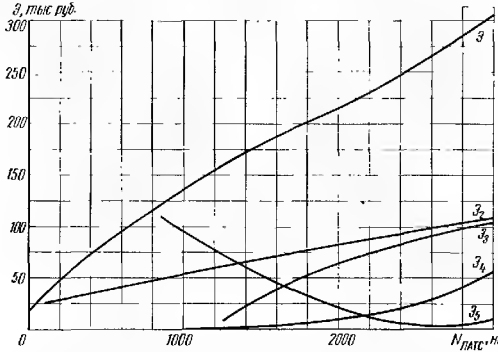



Рис. 5.2. Квадратичные формы зависимостей годовых эксплуатационных расходов на обслуживание всей системы производственной связи от монтированной емкости ПАТС

## 5.6. КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ И ДИРЕКТОРСКОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ

Существует большое количество различных типов станционных устройств диспетчерской и директорской связи, используемых на промышленных предприятиях и в строительстве. Номенклатура этих устройств непрерывно претерпевает изменения — снимаются с производства устаревшие установки, осваиваются и разрабатываются новые. В таких условиях особенно важно определить наиболее характерные закономерности, присущие всему классу данных средств связи, так как это позволит не только находить величину требуемых затрат на создание сетей прямой телефонной связи на базе имеющихся типов станций, коммутаторов и установок диспетчерской и директорской связи, но и прогнозировать ее в тех случаях, когда намечается применение новых устройств, затраты на которые еще не установлены.

Как и производственные автоматические телефонные станции, устройства диспетчерской и директорской телефонной связи отличаются между собой целой группой признаков (факторов, параметров), совокупность которых формирует понятие типа этого устройства. Стоимость оборудования станционных устройств диспетчерской и директорской телефонной связи характеризуется типом этих устройств.

Факторами, определяющими тип коммутатора (устройства, станции, установки), являются: а) емкость; б) проводность абоиентских линий; в) состав комплекта станционного оборудования; г) масса комплекта станционного оборудования.

Кроме того, устройства диспетчерской и директорской телефонной связи существенно отличаются между собой способом приема и передачи сообщений (микротелефонная трубка или микрофон с громкоговорителем), количеством рабочих мест и соединительных линий, способом ведения разговора (симплекс, дуплекс), возможностью проведения циркулярных и групповых совещаний, типом оконечных абонентских устройств, а также допустимой величиной сопротивления шлейфа абонентской линии, от которой во многом зависит выбор типа применяемого оборудования в конкретных условиях того или иного производства. Однако эти факторы (кроме четырех вышеназванных) являются несущественными.

В табл. 5.11 приводятся основные технические данные станционных устройств диспетчерской и директорской связи, корреляционный анализ которых был проведен с применением ЭВМ.

Таблица 5.11

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ЦЕНА СТАНЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДИСПЕТЧЕРСКИХ И ДИРЕКТОРСКИХ ТЕЛЕФОННЫХ УСТАНОВОК

| Типы установок | Емкость, номера | Проводность абонентских линий, жил | Кол-во блоков основного оборудования[1]) | Масса комплекта оборудования[1]), кг | Максимальная потребляемая мощность В·А | Максимальное сопротивление шлейфа абонентской линии Ом | Количество рабочих мест | Цена комплекта руб |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ТКМС | 5 | 2 | 1 | 4,0 | 100 | 800 | 1 | 46 |
| КОС-22М | 20 | 2 | 1 | 22,0 | 50 | 800 | 2 | 125 |
| ДГУ-20М | 20 | 2 | 2 | 42 | 300 | 500 | 1 | 642 |
| КД-6 | 6 | 4 | 2 | – | 200 | 400 | 1 | 670 |
| ДКЗ-40-2М | 40 | 2 | 2 | 150 | 240 | 1000 | 2 | 680 |
| УНС-20 | 15 | 2 | 3 | 103 | 100 | 1000 | 2 | 965 |
| ШИС | 20 | 2 | 3 | 11,2 | — | - | 1 | 1002 |
| СДС М-50/100 | 50;100 | 2 | 4;5 | 406 | 300 | 2000 | 2 | 1275 |
| КАСС-53 | 53 | 2 | 4 | 358 | 60 | 1000 | 1 | 1380 |
| ЭДТС-66 | 30;60 | 2 | 5;7 | 812 | 1000 | 1000 | 1÷4 | 1720 |
| САС-40 («Темп-40») | 40 | 4 | 5 | 118 | 300 | 2000 | 1 | 1800 |
| КД-18 | 17 | 4 | 2 | — | 200 | 400 | 1 | 1800 |
| КД-36 | 36 | 2;4 | 3 | — | 200 | 800 | 1 | 2470 |

[1]) Без телефонных аппаратов, источников электропитания.

На рис. 5.3—5.6 представлены линейные и квадратичные формы зависимости стоимости станционного оборудования от емкости $N$, общего числа жил абонентских линий, включенных в коммутатор $Ж$, числа блоков, входящих в комплект основного оборудования $Б$ и массы комплекта $G$. Данные, характеризующие полученные корреляционные зависимости, сведены в табл. 5.12. Как видно из таб-

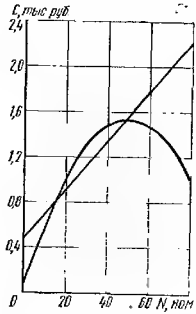



Рис. 5.3. Зависимость стоимости оборудования станционных устройств диспетчерской и директорской связи от их емкости (линейная и квадратичная формы)

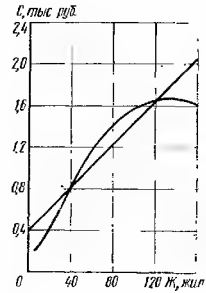



Рис. 5.4. Зависимость стоимости оборудования станционных устройств диспетчерской и директорской связи от числа включенных в них жил (линейная и квадратичная формы)

лицы, наименьшие ошибки аппроксимации получаются при кубической форме зависимости. Однако и в этом случае величины ошибок аппроксимации остаются достаточно высокими, а величины корреляционных отношений — малыми. Это свидетельствует о больших отклонениях фактических данных стоимости установок диспетчерской и директорской связи от значений, даваемых рассмотренными линиями регрессии. Можно предположить, что при ценообразовании не были достаточно четко учтены потребительские свойства установок прямой связи.

Из таблицы также видно, что квадратичные зависимости имеют максимумы. Аналитическое нахождение их дало следующие результаты: $N_{макс}=50$; $Ж_{макс}=143$, $Б_{макс}=5{,}5$; $G_{макс}=610$ кг. Максимумы при кубической форме зависимости не во всех случаях лежат в действительной области значений.

Рассмотренные зависимости позволяют предположить, что при существующем уровне техники оптимальные диспетчерские и ди-

ректорские установки должны иметь емкость меньше 50 номеров и двухпроводные абонентские линии.

Пользуясь данными табл. 5.12, можно ориентировочно определить стоимость любой диспетчерской или директорской установки, если известен хотя бы один из четырех рассмотренных выше параметров, характеризующих указанные установки. Эти данные

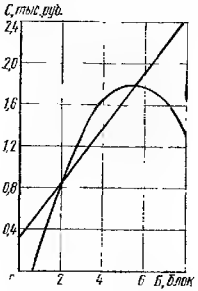



Рис. 5.5. Зависимость стоимости оборудования станционных устройств диспетчерской и директорской связи от количества блоков, входящих в их комплект (линейная и квадратичная формы)

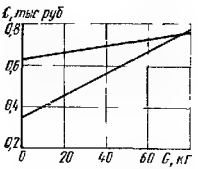



Рис. 5.6. Зависимость стоимости оборудования станционных устройств диспетчерской и директорской связи от массы комплекта (линейная и квадратичная формы)

можно также использовать при формировании функций приведенных затрат для осуществления выбора установки прямой телефонной связи и решения других задач оптимизации сетей диспетчерской и директорской связи.

Как и в случае производственной автоматической телефонной связи, весьма трудно отделить эксплуатационные расходы, относящиеся только к прямой телефонной связи, от эксплуатационных расходов, затрачиваемых на обслуживание всей системы производственной связи. Поэтому в данном разделе рассматриваются зависимости общей величины эксплуатационных расходов от числа коммутаторов прямой связи и их емкости. Данные о линейных, квадратичных и кубических формах зависимости величины годовых эксплуатационных расходов от числа коммутаторов $n$, входящих в состав системы производственной связи и их монтированной емкости, приведены в табл. 5.13. В этой же таблице приведены квадратичные формы зависимости отдельных элементов эксплуатационных расходов и численности службы связи от числа комму-

ДАННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЦЕНЫ СТАНЦИОННОГО
ТЫС. РУБ., ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

| Данные | Зависимости цены станционного оборудования диспетчерской | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | емкости $N$, номеров при формах зависимостей | | | числа жил абонентских линий, включаемых в коммутатор, жил, при формах зависимостей | |
| | линейной | квадратичной | кубической | линейной | квадратичной |
| Коэффициент линейной корреляции | 0,549 | | | 0,651 | |
| Корреляционное отношение | - | 0,592 | 0,594 | - | 0,703 |
| Дисперсия | 0,323 | 0,300 | 0,299 | 0,266 | 0,233 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 167,8 | 137,7 | 132,0 | 142,0 | 96,2 |
| Коэффициенты: | | | | | |
| $a_0$ | 0,492 | 0,0833 | 0,048 | 0,4 | —0,0534 |
| $a_1$ | 0,0214 | 0,0586 | 0,0795 | 0,0105 | 0,0263 |
| $a_2$ | — | 0,000586 | 0,00139 | — | 0,000097 |
| $a_3$ | — | - | 0,0000084 | - | |

таторов $n$. Все данные табл. 5.13 получены на основе статистического материала, приведенного в табл. 5.8. Линнейные, квадратичные и кубические формы завнсимостн в общем случае соответственно выражаются следующим образом:

$$y = a_0 + a_1 x; \tag{5.16}$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2; \tag{5.17}$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3, \tag{5.18}$$

где $y$ — общая величина годовых эксплуатационных расходов и ее составных частей, тыс. руб., или численность трудящихся в службе связи, чел., промышленного предприятия; $x$ — число диспетчерских и директорских коммутаторов в составе системы связи или емкость этих коммутаторов.

На рис. 5.7 представлены графически квадратичные формы зависимости общей величины эксплуатационных расходов от числа коммутаторов и их емкости.

Завнсимости, характеристики которых приведены в табл. 5.12 и 5.13, имеют очень малые величины коэффициента корреляцни и корреляционных отношений и дают высокие ошибки аппроксимации. Поэтому данные этих таблиц могут использоваться лишь как первое приближение при определении стоимости оборудования диспетчерской и директорской связи, а также степени влияния этой связи на общую величину эксплуатационных расходов и ее состав-



Таблица 5.12

ОБОРУДОВАНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ И ДИРЕКТОРСКОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ.

и директорской телефонной связи

| ний, включае- при формах зависимостей | числа блоков основного оборудования $Б$, блоков, при формах зависимостей | | | массы $G$, кг, при формах зависимостей | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| кубической | линейной | квадратичной | кубической | линейной | квадратичной | кубической |
| — | 0,630 | — | — | 0,670 | — | - |
| 0,718 | — | 0,731 | 0,750 | — | 0,774 | 0,853 |
| 0,224 | 0,278 | 0,215 | 0,202 | 0,180 | 0,131 | 0,089 |
| 81,3 | 140,5 | 62,3 | 37,2 | 187,3 | 115,2 | 36,7 |
| —0,447 | 0,327 | —0,543 | 1,33 | 0,627 | 0,353 | 0,0237 |
| 0,0494 | 0,265 | 0,857 | 1,75 | 0,00166 | 0,00488 | 0,0130 |
| —0,00042 | — | —0,0781 | —0,35 | | —0,000004 | 0,000037 |
| 0,00000127 | - | — | 0,0236 | — | — | 0,00000002 |

Таблица 5.13

ДАННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ И ЧИСЛЕННОСТИ ТРУДЯЩИХСЯ СЛУЖБЫ СВЯЗИ ОТ ЧИСЛА КОММУТАТОРОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ И ИХ ЕМКОСТИ

| Аппроксимирующая функция | Коэффициент корреляции или корреляционное отношение |
|---|---|
| $Э = 64,6 + 8,1\ n$ | 0,61 |
| $Э = -220 + 23,7\ n - 0,163\ n^2$ | 0,72 |
| $Э = 4,95 + 0,25\ N$ | 0,89 |
| $Э = 11,5 + 0,24\ N + 0,004\ N^2 \cdot 10^{-3}$ | 0,89 |
| $з_2 = 19,9 + 1,4\ n + 0,066\ n^2$ | 0,87 |
| $з_3 = -12,4 + 0,6\ n + 0,082\ n^2$ | 0,91 |
| $з_4 = -117 + 12,2\ n - 0,153\ n^2$ | 0,99 |
| $з_5 = 552 + 35,9\ n - 0,5\ n^2$ | 0,91 |
| $R = 0,55 + 5,3\ n - 0,04\ n^2$ | 0,63 |
| $R = 448 - 0,308\ N + 0,078\ N^2 \cdot 10^{-3}$ | 0,86 |

В таблице обозначено: $Э$ — общая величина годовых эксплуатационных расходов, тыс. руб.; $з_2$ — годовые эксплуатационные расходы на заработную плату работникам службы связи, тыс. руб.; $з_3$ — амортизационные отчисления, тыс. руб.; $з_4$ - годовые затраты на материалы и запасные части, тыс. руб.; $з_5$ — прочие производственные затраты, тыс. руб.; $R$ — общая численность службы связи, чел.; $n$ — число коммутаторов в составе системы производственной связи, шт.; $N$ суммарная монтированная емкость коммутаторов, номеров

ных частей. Для получения более точных функций необходимо увеличить объем исходной статистической информации и применить множественную корреляцию.

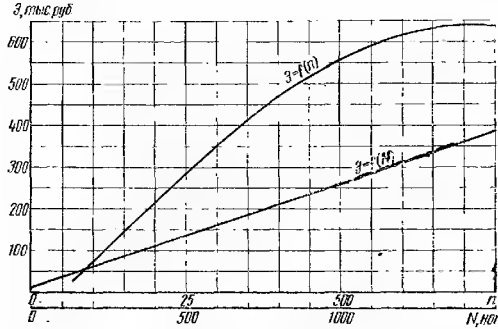



Рис. 5.7. Квадратичные формы зависимости годовых эксплуатационных расходов на обслуживание системы производственной связи от числа коммутаторов прямой связи и их емкости

## 5.7. КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ РАДИОСВЯЗИ

Для организации радиосвязи на промышленных предприятиях и в строительстве используются радиостанции, работающие в основном в диапазоне ультракоротких волн [7]. При анализе зависимости стоимости радиостанций существенными факторами являются комплектность и масса радиостанции, дальность связи, мощность передатчика.

В табл. 5.14 приведены основные технические и стоимостные данные производственных радиостанций, используемые при корреляционном анализе, который проводился отдельно для стационарных мобильных и носимых радиостанций. Основные данные указанного анализа сведены в табл. 5.15. Из таблицы следует, что для всех рассмотренных зависимостей коэффициент линейной корреляции крайне низок, что свидетельствует о невозможности аппроксимации опытных данных прямой линией. Действительно, разбросы значений функции (цены радиостанции) и аргументов (влияющих факторов), как видно из табл. 5.14, очень значительны. Даже кубическая форма зависимости в большинстве случаев существенно не улучшает качество аппроксимации.

Для стационарных радиостанций удовлетворительное совпадение аппроксимирующей кривой с фактическими данными о цене

Таблица 5.14

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И СТОИМОСТНЫЕ ДАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАДИОСТАНЦИЙ

| Типы радиостанций | Средняя частота, МГц | Чувствительность, мкВ | Напряжение источника питания, В | Кол-во каналов | Масса, кг | Дальность связи, км | Мощность Вт | Состав комплекта | Цена руб. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Стационарные* | | | | | | | | | |
| 42Р1 | 39,5 | 1,5 | 220 | 1 | 49 | 20 | 6 | 6 | 470 |
| 43Р3 | 161 | 1,5 | 220 | 3 | 45 | 20 | 6 | 5 | 470 |
| ЖР-3М | 2,36 | 150 | 220 | 2 | 57 | 15 | 10 | 6 | 510 |
| ЖР-5М | 152,5 | 4 | 220 | 1 | 83 | 15 | 6 | 10 | 545 |
| 40Р1 | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 115 | 15 | 4 | 8 | 990 |
| «Пальма-ЦС» | 157 | 1,0 | 220 | 3 | 45 | 30 | 8 | 6 | 1485 |
| «Гранит-ЦС» | 39,5 | 1,5 | 220 | 1 | 100 | 30 | 40 | 4 | 1940 |
| *Мобильные* | | | | | | | | | |
| 28Р3 | 161 | 1,5 | 12 | 3 | 15 | 15 | 6 | 4 | 385 |
| 33Р1 | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 15 | 15 | 6 | 4 | 385 |
| 30Р3 | 161 | 1,5 | 12 | 3 | 20 | 10 | 6 | 6 | 430 |
| 08Р1 | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 35 | 10 | 4 | 7 | 590 |
| 10Р1 | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 75 | 10 | 4 | 7 | 990 |
| 09Р1 | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 105 | 10 | 4 | 10 | 990 |
| «Гранит-АС» | 39,5 | 1,5 | 12 | 1 | 13 | 30 | 10 | 4 | 1030 |
| «Пальма-АС» | 157 | 1,0 | 12 | 3 | 22,8 | 30 | 8 | | 1485 |
| *Носимые* | | | | | | | | | |
| «Недра-П» | 1,75 | 1,0 | 15 | 1 | 4 | 30 | 0,5 | 1 | 118 |
| «Чиж» | 38,5 | 2,0 | 2,4 | 1 | 3,8 | 3 | 0,4 | 1 | 220 |
| 27Р1 | 161 | 2,0 | 3,0 | 1 | 3,5 | 3,5 | 0,3 | 1 | 308 |
| «Стройка» | 34,5 | 3,0 | 12,5 | 1 | 0,7 | 1 | 0,07 | 1 | 500 |
| «Тюльпан» (61Р1) | 157 | 1,5 | 7,5 | 1 | 1,0 | 1 | 0,1 | 1 | 610 |
| «Ласточка» (60Р1) | 39,5 | 1,0 | 7,5 | 1 | 0,9 | 1 | 0,1 | 1 | 610 |
| «Кактус» (58Р1) | 39,5 | 1,0 | 12,5 | 1 | 1,6 | 4 | 1,0 | 1 | 970 |

радиостанций дает квадратичная форма зависимости от дальности связи, представленная на рис. 5.8. Для мобильных станций единственно близкой к функциональной является зависимость цены радиостанции от мощности передатчика, выраженная полиномом третьей степени. Более результативным оказался анализ данных о носимых радиостанциях, который позволил установить наличие функциональных зависимостей (рис. 5.9) цены радиостан-

Таблица 5.15

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНЫ РАДИОСТАНЦИЙ ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

| Характеристика зависимости | Цена радиостанций от | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | массы радиостанций | | | дальности связи радиостанций | | | мощности передатчика радиостанций | | | состава комплекта радиостанций | |
| | стационарных | мобильных | носимых | стационарных | мобильных | носимых | стационарных | мобильных | носимых | стационарных | мобильных |
| Коэффициент корреляции | 0,40 | 0,31 | 0,75 | 0,82 | 0,61 | 0,54 | 0,76 | 0,33 | 0,33 | 0,42 | 0,47 |
| Корреляционные отношения при зависимостях: | | | | | | | | | | | |
| — квадратичной | 0,42 | 0,32 | 0,96 | 0,94 | 0,83 | 0,54 | 0,77 | 0,52 | 0,97 | 0,54 | 0,50 |
| — кубической | 0,74 | 0,33 | 0,99 | 0,94 | 0,83 | 0,96 | 0,77 | 0,95 | 0,99 | 0,74 | 0,60 |

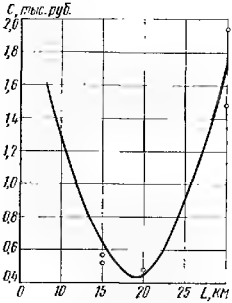



Рис. 5.8. Квадратичная форма зависимости стоимости стационарных радиостанций от дальности их действия

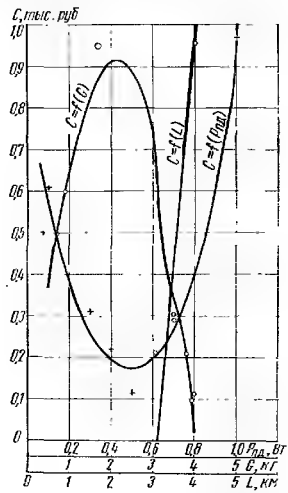



Рис. 5.9. Зависимости стоимости носимых радиостанций от влияющих факторов

ций от массы и мощности передатчика (квадратичная форма зависимости), а также от дальности связи (кубическая форма зависимости).

Стоимость стационарной радиостанции в зависимости от дальности связи имеет минимум. Эта зависимость имеет вид:

$$C = 4{,}6 - 0{,}43L + 0{,}111L^2, \text{ тыс. руб.,} \qquad (5.19)$$

где $L$ — дальность связи, км. Дифференцируя данную функцию по $L$ и приравнивая производную нулю, получим, что $L_{опт} = 19{,}4$ км.

Зависимость стоимости мобильных радиостанций от мощности передатчика выражается формулой

$$C = 18{,}7 - 8{,}8P_{пд} + 1{,}35P_{пд}^2 - 0{,}064P_{пд}^3, \text{ тыс. руб.,} \qquad (5.20)$$

где $P_{пд}$ — мощность передатчика, Вт.

После дифференцирования ф-лы (5.20) и приравнивания нулю производной получаем уравнение: $0{,}19\,P_{пд}^2 - 2{,}7\,P_{пд} + 8{,}8 = 0$. Его корнями являются $P_{пд\,макс} = 5{,}2$, $P_{пд\,макс} = 8{,}75$. При этих значениях функция (5.20) принимает соответственно минимальное и максимальное значения. Экстремальным величинам $P_{пд}$ соответствуют значения стоимости мобильных радиостанций $C_{мин} = 237$ руб. и $C_{макс} = 1687$ руб.

Функциональные зависимости для носимых радиостанций имеют вид:

$$C = 1{,}94 - 1{,}79L + 0{,}433L^2 - 0{,}0125L^3, \text{ тыс. руб.;} \qquad (5.21)$$

$$C = 0{,}038 + 0{,}931G - 0{,}227G^2, \text{ тыс. руб.;} \qquad (5.22)$$

$$C = 0{,}784 - 2{,}56P_{пд} + 2{,}71\,P_{пд}^2, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.23)$$

Как видно из ф-л (5.21)—(5.23) и рис. 5.9, все три функции имеют экстремумы: а) минимум зависимости от мощности передатчика при $P_{пд} = 0{,}475$ Вт и от дальности связи при $L = 2{,}3$ км; б) максимум зависимости от массы радиостанции при $G = 2{,}05$ кг. Следует отметить, что экстремальные значения функции (цены радиостанций) не являются надежными вследствие недостаточности статистики. В самом деле, трудно ожидать, что при некоторых значениях влияющих факторов стоимость радиостанции может быть нулевой или даже отрицательной, как это следует из рис. 5.9.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что ни один из рассмотренных факторов не является определяющим при установлении зависимости стоимости радиостанций. Поэтому применение множественной корреляции в данном случае окажется особенно эффективным.

Интересно проследить зависимость стоимости строительно-монтажных работ от высоты подъема мачты. Для этих целей были рассмотрены некоторые проекты одного специализированного проектного института. Высокий коэффициент линейной корреляции (0,97) указывает на наличие функциональной связи. Квадратич-

ная форма зависимости имеет вид (корреляционное отношение — 0,98):

$$C_{с/м} = 13{,}2 + 1{,}11h + 0{,}0767h^2, \text{ тыс. руб.,} \qquad (5.24)$$

где $h$ — высота подъема мачты, м. Графически зависимость (5.24) представлена на рис. 5.10.

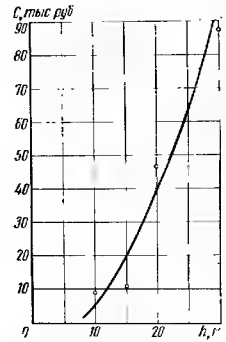



Рис. 5.10. Зависимость стоимости строительно-монтажных работ от высоты подъема антенн

Величина годовых эксплуатационных расходов на обслуживание системы производственной связи мало зависит от количества радиостанций, работающих в составе данной системы. Это объясняется тем, что в качестве исходной статистики используются данные, собранные на металлургических предприятиях страны, где удельный вес радиосвязи в общем комплексе устройств передачи информации весьма незначителен. Поэтому даже кубическая форма зависимости величины годовых эксплуатационных расходов от количества радиостанций имеет корреляционное отношение всего 0,38. Эта формула имеет такой вид:

$$Э = 265 + 71{,}6n - 1{,}08n^2 + 0{,}0036n^3, \text{ тыс. руб.,} \qquad (5.25)$$

где $n$ — количество радиостанций.

Плановая численность трудящихся, занятых в службе связи,

$$R = 242 - 1{,}62n + 0{,}01n^2, \text{ чел.} \qquad (5.26)$$

Корреляционное отношение здесь составляет 0,9.

Плановые численности инженерно-технических работников и рабочих службы связи соответственно равны:

$$R_{итр} = -30 + 0{,}77n - 0{,}0022n^2, \text{ чел.;} \qquad (5.27)$$

$$R_{раб} = 134 - 0{,}527n + 0{,}0053n^2, \text{ чел.} \qquad (5.28)$$

Здесь корреляционные отношения равны 0,85—0,87.

## 5.8. КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ГРОМКОГОВОРЯЩЕЙ СВЯЗИ

В данном разделе рассматриваются функциональные зависимости величины капитальных и эксплуатационных затрат на сооружения сетей производственной громкоговорящей связи как с абонентскими, так и с центральными усилителями от влияющих факторов. В табл. 5.16 и 5.17 приведены основные технические и стои-

Таблица 5.16

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И СТОИМОСТНЫЕ ДАННЫЕ АППАРАТУРЫ ПГС С АБОНЕНТСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

| Тип аппаратуры | Емкость номеров | Кол-во одновременных связей | Развиваемая мощность Вт | Потребляемая мощность, Вт | Допустимое сопротивление шлейфа, Ом | Масса кг | Цена тыс. руб. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПУ-1 | 2 | 1 | 0,25 | 10 | 200 | 6 | 0,07 |
| ПГСИ-10 | 10 | 5 | 10 | 120 | 200 | 397 | 3,3 |
| ПГСЦ-10 | 10 | 1 | 10 | 120 | 200 | 290 | 2,4 |
| ПГС-1К | 10 | 1 | 10 | 60 | 1000 | 105 | 0,7 |
| ПГСП3-120 | 10 | 1 | 3 | 10 | 1000 | 135 | 0,5 |
| ГСШ | 10 | 5 | 25 | — | — | 19,3 | 0,6 |
| ПГСИ-30 | 30 | 15 | 10 | 120 | 500 | 1205 | 8,8 |

Таблица 5.17

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И СТОИМОСТНЫЕ ДАННЫЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

| Тип усилителя | Чувствительность мкВ | Неравномерность частотной характеристики, дБ | Кол-во входов | Нелинейные искажения, % | Развиваемая мощность, Вт | Потребляемая мощность, кВт | Число блоков в комплекте | Масса, кг | Цена, тыс. руб. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| УМ-60А | 0,6 | 3 | 2 | 3 | 50 | 0,190 | 2 | 20 | 0,09 |
| ТУ-50М | 0,6 | 3 | 2 | 2,5 | 50 | 0,280 | 7 | 52 | 0,35 |
| ТУ-100М | 0,6 | 3 | 2 | 4 | 100 | 0,420 | 7 | 61 | 0,37 |
| ТУ-600 | 0,6 | 1,5 | 1 | 4 | 600 | 1,800 | 7 | 199 | 0,52 |
| АГУ-10 | 5 | 3 | 1 | 7 | 10 | — | 3 | 3,9 | 0,04 |
| ЭПМ-2 | — | — | — | — | 3 | — | 1 | 1,7 | 0,07 |
| ТУ-5-4 | — | 2 | — | 2,0 | 5000 | 12,0 | 1 | - | 1,77 |

мостные данные аппаратуры ПГС соответственно с абонентскими и центральными усилителями.

Существенными факторами при анализе стоимости аппаратуры ПГС с абонентскими усилителями оказались емкость системы и масса комплекта оборудования. На рис. 5.11 приведены зависимости стоимости оборудования системы ПГС с абонентскими усилителями от емкости системы (коэффициент линейной корреляции — 0,926, корреляционное отношение при квадратичной фор-

ме зависимости — 0,939) и от ее массы (коэффициент линейной корреляции — 0,993, корреляционное отношение при квадратичной форме зависимости — 0,994). Уравнения квадратичной формы этих зависимостей имеют вид:

$$C = -0{,}16 + 0{,}104n + 0{,}0064n^2, \text{ тыс. руб.;} \qquad (5.29)$$

$$C = 0{,}02 + 8{,}16G - 0{,}713G^2, \text{ тыс. руб.,} \qquad (5.30)$$

где $n$ — количество абонентских усилителей (емкость системы ПГС), шт.; $G$ — масса комплекта оборудования системы, т.

Существенными факторами при анализе стоимости центральных усилителей являются масса комплекта усилителя (коэффициент линейной корреляции — 0,885, корреляционное отношение при квадратичной форме зависимости — 0,985), потребляемая мощ-

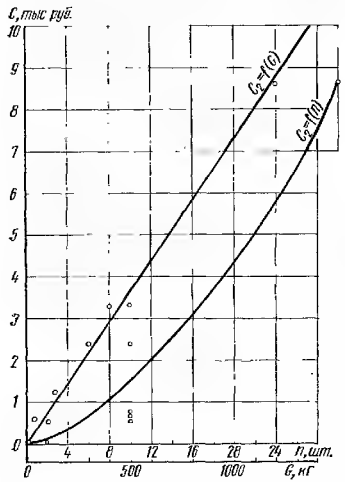



Рис. 5.11. Зависимость стоимости оборудования аппаратуры производственной громкоговорящей связи с абонентскими усилителями от количества и массы систем

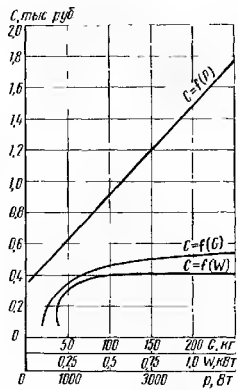



Рис. 5.12. Зависимость стоимости оборудования аппаратуры производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями от влияющих факторов

ность (коэффициент линейной корреляции — 0,987, корреляционное отношение при квадратичной форме зависимости — 0,989), количество входов (коэффициент линейной корреляции — 0,588, кор-

реляционное отношение при квадратичной форме зависимости — 978), развиваемая мощность (коэффициент линейной корреляции — 0,973, корреляционное отношение при квадратичной форме зависимости 0,982).

Квадратичные формы указаиных зависимостей, приведенных на рис. 5.12 имеют вид:

$$C = -0{,}019 + 0{,}007G - 0{,}000023G^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (5.31)$$

$$C = 0{,}207 + 0{,}197W - 0{,}0056W^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (5.32)$$

$$C = -11{,}3 + 11{,}9m - 2.70m^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (5.33)$$

$$C = 1{,}66 - 0{,}90P + 0{,}10P^2, \text{ тыс. руб.,} \quad (5.34)$$

где $G$ - масса, кг; $W$ — потребляемая мощность; $m$ — количество входов; $P$ развиваемая мощность, Вт.

На рис. 5.13 представлена зависимость общей стоимости строительства сети ПГС с абонентскими усилителями от длины линии, построенная по даиным одного из проектных институтов. Корреляционное отношение при квадратичной форме — 0,998. Квадратичная форма зависимости имеет вид

$$C = 67{,}6 - 1{,}36L + 0{,}00685L^2, \text{ тыс. руб.,} \quad (5.35)$$

где $L$ — длина абоиентской линии, м.

Минимум функции четко выражен при $L = 100$ м. Данный экстремум не имеет физического смысла, и поэтому использовать можно только восходящую ветвь параболы, т. е. при длине абоиентской линии свыше 100 м. При меньших длинах абонентских линий должна использоваться другая расчетная формула.

Длина линии является главным аргументом функции капитальных затрат на сооружение сети ПГС с центральными усилителями. Это объясняется тем, что, в отличие от системы с абонентскими усилителями, центральный усилитель в сети, как правило, один. На рис. 5.14 представлены зависимости стоимости (общей и ее компонент) строительства сети ПГС с центральными усилителями от длины линии. Коэффициенты линейной корреляции равны: для общей стоимости 0,906, стоимости оборудования 0,842, стоимости строительно-монтажных работ 0,984, корреляционные отношения при квадратичной форме зависимости соответственно 0,988; 0,996; 0,984. Квадратичные формы зависимости имеют вид:

1) общая стоимость

$$C = +1{,}94 - 0{,}20L + 0{,}00173L^2, \text{ тыс. руб.} \quad (5.36)$$

2) стоимость оборудования

$$C_{\text{обор}} = 42{,}4 - 0{,}835L + 0{,}00412L^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (5.37)$$

3) стоимость строительно-монтажных работ

$$C_{\text{с/м}} = -1{,}76 + 0{,}0210L + 0{,}00002L^2, \text{ тыс. руб.,} \quad (5.37')$$

где $L$ — длина линии с включенными громкоговорителями, м.

Параметрами, характеризующими оснащение промышленных предприятий и строек средствами производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями, являются количество центральных усилителей $n$ и развиваемая ими мощность $W$. Величина

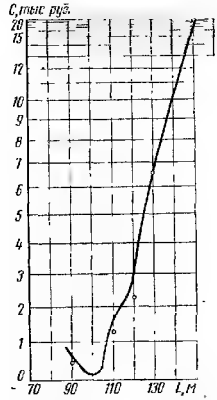



Рис. 5.13. Зависимость общей стоимости строительства сети ПГС с абонентскими усилителями от длины линии

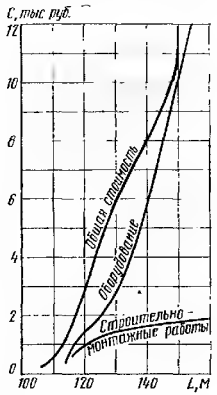



Рис. 5.14. Зависимость стоимости (всего, оборудования, строительно-монтажных работ) строительства сети *ПГС* с центральными усилителями от длины линии

годовых эксплуатационных расходов на обслуживание системы производственной связи в зависимости от этих параметров с корреляционными отношениями 0,83 и 0,91 представляется формулами:

$$\Theta = 133 + 8{,}5n + 0{,}0118n^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (5.38)$$

$$\Theta = 160 - 5{,}48W + 2.74W^2, \text{ тыс. руб.} \quad (5.39)$$

## 5.9. КАПИТАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

В настоящее время используются промышленные телевизионные установки (ПТУ) с видиконными и суперортиконными передающими камерами. Тип передающей камеры в решающей степени определяет основные технические и стоимостные характеристики установок, которые приведены в табл. 5.18 отдельно для видиконных и суперортиконных ПТУ. Существенными факторами при

Таблица 5.18

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И СТОИМОСТНЫЕ ДАННЫЕ ПТУ

| Тип ПТУ | Количество камер | Количество блоков | Масса т | Потребляемая мощность кВт | Цена тыс. руб. |
|---|---|---|---|---|---|
| *Видиконные установки* | | | | | |
| ПТУ-26 | 1 | 4 | 0,0735 | 0,35 | 2,0 |
| ПТУ-27 | 1 | 4 | 0,0835 | 0,35 | 2,2 |
| ПТУ-22 | 1 | 9 | 0,125 | 0,50 | 4,0 |
| ПТУ-23 | 5 | 23 | 0,27 | 0,85 | 6,5 |
| ПТУ-24 | 10 | 38 | 0,450 | 1,2 | 11,8 |
| *Суперортиконные установки* | | | | | |
| ПТУ-101 | 1 | 10 | 0,120 | 1,0 | 3,1 |
| ПТУ-105 | 1 | 10 | 0,201 | 1,3 | 4,2 |
| ПТУ-102 | 6 | 27 | 0,320 | 1,3 | 9,8 |
| ПТУ-106 | 6 | 31 | 0,815 | 1,3 | 15,0 |
| ПТУ-103 | 12 | 45 | 0,585 | 1,6 | 17,2 |

определении функциональной зависимости стоимости оборудования ПТУ в обоих случаях являются количество камер, количество блоков в комплекте системы, масса комплекта системы, потребляемая мощность. Коэффициенты линейной корреляции функции стоимости комплекта от указанных параметров для видиконных установок — 0,981÷0,992; для суперортиконных — 0,900÷0,971; корреляционные отношения при квадратичной форме зависимости соответственно равны 0,981÷0,995 и 0,955÷0,980.

Линейные формы рассматриваемых зависимостей представлены на рис. 5.15—5.18, а квадратичные формы имеют вид:

1) для видиконных установок:

$$C = 1{,}86 + 0{,}867n + 0{,}0123n^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.40)$$

$$C = 1{,}58 + 0{,}172B + 0{,}00244B^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.41)$$

$$C = 0{,}711 + 19{,}7G + 10{,}4G^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.42)$$

$$C = 0{,}621 + 2{,}91W + 5{,}23W^2, \text{ тыс. руб.}; \quad (5.43)$$

2) для суперортиконных установок:

$$C = 1{,}38 + 2{,}36n - 0{,}0865n^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.44)$$

$$C = -2{,}3 + 0{,}630B - 0{,}0042B^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.45)$$

$$C = -5{,}2 + 63{,}8G - 47{,}21G^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.46)$$

$$C = -54{,}1 + 79{,}7W - 21{,}9W^2, \text{ тыс. руб.} \quad (5.47)$$

В этих формулах масса представляется в тоннах, а потребляемая мощность — в кВт; приняты следующие обозначения: $n$ — количество камер; $B$ — количество блоков в комплекте системы; $G$ — масса комплекта; $W$ — потребляемая мощность.

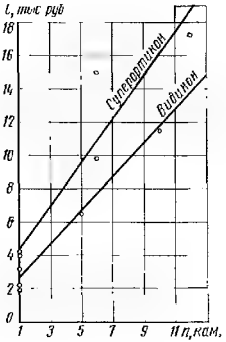



Рис. 5.15. Зависимость стоимости промышленных телевизионных установок от числа камер

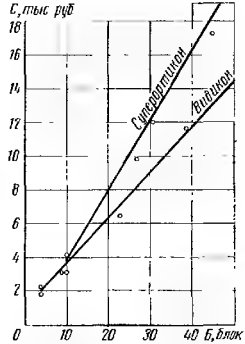



Рис. 5.16. Зависимость стоимости промышленных телевизионных установок от количества блоков в комплекте системы

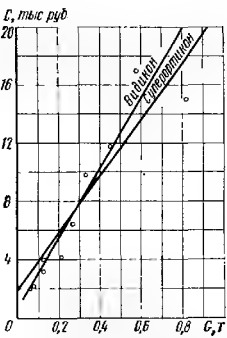



Рис. 5.17. Зависимость стоимости промышленных телевизионных установок от их массы

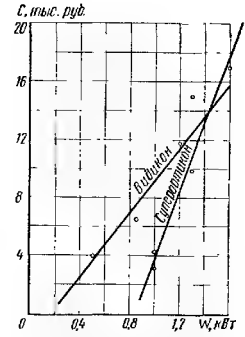



Рис. 5.18. Зависимость стоимости промышленных телевизионных установок от потребляемой мощности

## 5.10. КАПИТАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ РУЧНЫХ ТЕЛЕФОННЫХ СТАНЦИЙ

Ручные телефонные станции, которые в течение многих лет играли роль основных коммутационных узлов на промышленных предприятиях, активно вытесняются автоматическими телефонными станциями. Это можно показать на примере Криворожского железнорудного бассейна, на шахтах которого в 1955 г. действовало около 70 ручных телефонных станций общей емкостью 6300 номеров и одна автоматическая телефонная станция емкостью 800 номеров, а в 1970 г. — 10 автоматических телефонных станций общей емкостью около 12 000 номеров и меньше 10 ручных телефонных станций небольшой суммарной емкостью.

Однако в некоторых случаях по условиям производства автоматическая телефонная связь либо не может быть применена вообще, либо затруднена по организационным или технологическим причинам. Кроме того, ручные телефонные станции продолжают эксплуатироваться на сетях междугородной связи. Знание величины капитальных затрат на сооружение ручных телефонных станций необходимо и для сравнения различных вариантов организации производственной телефонной связи.

Основным (а возможно, и единственным) фактором, определяющим величину капитальных затрат на сооружение ручных телефонных станций, является их емкость (абонентская — для местных станций, количество каналов — для междугородных станций). Данные о стоимостях ручных телефонных станций в зависимости от их емкости приведены в табл. 5.19. Корреляционные зависимости цены станции УРТС-100/600 от ее емкости имеют вид:

Таблица 5.19

ЦЕНА РУЧНЫХ ТЕЛЕФОННЫХ СТАНЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ЕМКОСТИ

| Тип и назначение станций | Емкость (номеров или каналов) | Цена, тыс. руб. |
|---|---|---|
| УРТС-100/600 для местной связи | 100 | 0,7 |
| | 200 | 1,3 |
| | 300 | 2,0 |
| | 400 | 2,7 |
| | 500 | 3,4 |
| | 600 | 3,4 |
| МРУ для междугородной связи | 20 | 4,2 |
| | 40 | 6,9 |
| | 60 | 10,9 |
| | 80 | 14,3 |
| | 100 | 19,7 |
| | 120 | 23,5 |
| | 140 | 25,4 |
| | 160 | 27,9 |
| | 180 | 30,6 |
| | 200 | 35,3 |
| | 220 | 38,6 |
| | 240 | 43,2 |
| | 260 | 46,7 |
| | 280 | 49,8 |
| | 300 | 52,2 |

1) линейная форма (коэффициент корреляции — 0,984)

$$C = 0{,}185 + 0{,}585N, \text{ тыс. руб.}; \qquad (5.48)$$

2) квадратичная форма (корреляционное отношение – 0,994)

$$C = -0{,}345 + 0{,}982N \quad 0{,}057N^2, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.49)$$

Аналогичные зависимости для станций МРУ:

1) линейная форма (коэффициент корреляции - 0,998).

$$C \cdot 0{,}782 + 17{,}4v, \text{ тыс. руб.;} \qquad (5.50)$$

2) квадратичная форма (корреляционное отношение 0,998; средняя ошибка аппроксимации — 3,4%)

$$C - 0{,}462 + 17{,}9v - 0{,}176v^2, \text{ тыс. руб.} \qquad (5.51)$$

В этих формулах абонентская емкость $N$ выражена в сотнях номеров, а число междугородных каналов $v$ — в сотнях каналов.

## 5.11. КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Общие положения.* Капитальные затраты на линейные сооружения занимают значительное место в общих затратах на создание систем производственной связи. Поэтому их аналитическое выражение через влияющие факторы позволит получить заметный экономический эффект за счет принятия более близких к оптимальным технических решений.

В настоящее время на промышленных предприятиях и в строительстве в составе систем производственной связи используются кабели бронированные и небронированные, в свинцовой или неметаллической оболочке, парные и четверочные. Эти кабели маркируются — ТГ и ТБ (в свинцовой оболочке, с парной скруткой), ТПП и ТПВ (в неметаллической оболочке, с парной или четверочной скруткой жил). Диаметр жил указанных кабелей -0,4; 0,5 или 0,7 мм.

В случаях, когда требуется обеспечить небольшую величину затухания на большом расстоянии, применяются кабели типов ТЗГ и ТЗБ с жилами диаметром 0,8; 0,9 и 1,2 мм. Для высокочастотного уплотнения используются специальные кабели типов МКСГ, МКСБ, одночетверочные кабели различных типов. При этом всегда цена кабеля определяется его типом и емкостью (числом пар, четверок). В свою очередь, тип кабеля характеризуется его конструкцией (бронированный, голый, в неметаллической или свинцовой оболочке и т. д.), материалом и диаметрами жилы, а также массой кабеля. Поскольку между этими параметрами существуют определенные функциональные связи, можно рассматривать зависимость цены кабеля от меньшего числа факторов. В частности, можно показать, что цена кабеля является функцией трех переменных: емкости кабеля ($v$), диаметра жил ($d$) и конструктивных особенностей кабеля. Именно в таком виде она (цена) отражена в действующих прейскурантах, т. е.

$$C = f(v,\ d,\ \text{констр.}) \qquad (5.52)$$

На любом участке кабельной сети должно быть организовано необходимое количество связей с требуемым качеством. Количество связей определяется емкостью кабеля - числом пар или четверок для низкочастотных связей или числом каналов для кабелей, уплотняемых аппаратурой вч. Емкость кабеля предполагается известной из предшествовавших расчету кабельной сети расчетов потоков телефонного сообщения.

Качество связи должно быть таким, чтобы обеспечивалась нормальная слышимость при разговоре абонентов и надежная работа приборов АТС. С этой точки зрения к участку кабельной сети длиной $l$ км предъявляются определенные требования по величине затухания ($A$), сопротивлению жил ($R$) и электрической емкости ($C$). Перечисленные параметры не являются равноправными: если выполнена норма по затуханию, то тогда, как правило, выполняются требования и по величинам сопротивления и емкости. Таким образом, цена кабеля может быть выражена в виде функции:

$$C = f(v,\ A,\ l). \tag{5.53}$$

Для приведения функции (5.52) к виду (5.53) необходимо для любой конструкции кабеля установить функциональную связь $d = f(A,\ l)$. С помощью метода наименьших квадратов можно найти, что такой функцией является

$$d = 0{,}13 + \frac{0{,}46l}{A}. \tag{5.54}$$

При применении этой формулы отклонения фактических данных от расчетных составят 2—3%. Для уменьшения ошибки следует рассматривать функцию $d = f(A,\ l,$ констр.) Например, для кабелей местной связи (с диаметром жил не выше 0,7 мм) и междугородных (с диаметром жил 0,8 мм и выше) расчетные формулы соответственно будут иметь вид:

$$d_0 = 0{,}12 + \frac{0{,}485l}{A}; \tag{5.55}$$

$$d_1 = -0{,}04 + \frac{0{,}54l}{A}, \tag{5.56}$$

где $d_0$ относится к местным, а $d_1$ — к междугородным кабелям. В данном случае отклонения в основном не превышают 1%. Такая ошибка аппроксимации для практических расчетов достаточно мала. Это позволяет использовать ф-лы (5.55) и (5.56) в дальнейшем. Корреляционные отношения этих формул выше 0,999. Необходимость корреляционного анализа вытекает из невозможности вывода теоретической формулы, которая могла бы применяться в практических расчетах. Известно, что затухание участка низкочастотного неуплотненного кабеля определяется по формуле

$A=\alpha l$, где $\alpha$ – километрическое затухание кабеля, дБ/км. В области низких частот

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega C}{2}(R_1 - \omega L)}. \tag{5.57}$$

Для рассматриваемых кабелей сопротивление жил шлейфа протяженностью 1 км

$$R_1 = \kappa \rho \frac{4000}{\pi d^2} = \frac{44{,}6\kappa}{d^2}, \tag{5.58}$$

где $\rho$ — удельное сопротивление меди, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; $\kappa$ — коэффициент укрутки; $d$ — диаметр токоведущей жилы, мм.

Подставив значение $R_1$ в вышеприведенную формулу, получим

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega C}{2} 44{,}6\kappa \frac{1}{\frac{A^2}{l^2} + \omega L}}. \tag{5.59}$$

Использование для практических расчетов ф-лы (5.57) не может быть рекомендовано из-за входящих в правую часть $C$ и $L$, зависящих от диаметра токоведущей жилы. Установить эти зависимости теоретически весьма затруднительно. Кроме того, поскольку электрическая емкость зависит от конструкции кабеля (расстояния между центрами жил), то она не является постоянной и для различных кабелей одного и того же диаметра жил. Последним объясняется разница в величинах затухания отдельных строительных длин одного и того же кабеля. Все это вместе взятое предопределяет использование статистических зависимостей случайных величин диаметра токоведущих жил и километрического затухания.

Вообще говоря, функция цены кабеля от его емкости и километрического затухания не может дать полного совпадения с фактическими данными по следующим принципиальным соображениям:

а) аппроксимирующая опытные данные функция рассматривается как плавная и непрерывная. Фактически же промышленность выпускает кабели только строго определенных градаций по емкости и диаметру жил, поэтому функция является ступенчатой;

б) из-за отсутствия единых конструкций кабелей связи вследствие различного технологического оборудования на кабельных заводах имеется большой разброс данных о массе и других характеристиках кабелей, выпускаемых различными заводами.

Ниже рассматриваются корреляционные зависимости цены от влияющих факторов для отдельных типов кабелей.

*Цена кабелей местной связи.* Выше указывалось, что цена кабелей местной связи зависит от четырех параметров: диаметра жил, числа пар (емкости), диаметра кабеля и его массы. Анализ фактических данных позволяет сделать вывод о том, что наилучшим приближением является полином второй степени. Коррелят-

ционные отношения в этом случае превышают 0,99, точность составляет величину менее 3%. Когда в качестве аргумента используется масса кабеля, точность менее 1%.

Рассматриваемые зависимости могут быть записаны в виде ф-лы (5.17), где $y$ — стоимость 1 км кабеля соответствующего типа с диаметром жил 0,4; 0,5 и 0,7 мм, тыс. руб.; $x$ — либо емкость кабеля (число пар $v$), либо внешний диаметр кабеля $D$, мм, либо масса кабеля $G$, т.

Величины коэффициентов, входящих в ф-лу (5.17), определены с помощью ЭВМ и приведены в табл. 5.20. При решении ряда задач (например, построения кабельной сети ПАТС, узлообразования и других) использование выражения зависимости стоимости кабеля от его емкости в виде полинома второй степени приводит к весьма громоздким и неудобным формулам. Между тем совершенно незначительная потеря в точности (всего доли процента) при линейной форме этой зависимости позволяет получить результаты, которые можно легко использовать на практике.

Коэффициенты линейной корреляции функции $C=f(v)$ вида (5.16) для всех типов кабелей равны 0,97—0,99.

На рис. 5.19 и 5.20 представлены линейные формы зависимости цены различных кабелей от их емкости. Следует отметить, что при емкости кабеля свыше 100×2 все прямые — непересекающиеся, что свидетельствует о наличии устойчивого распределения кабелей, по их цене.

*Масса меди.* Для решения некоторых задач необходимо знать массу меди, из которой изготавливаются токоведущие жилы. Масса токоведущей жилы определяется по формуле

$$g_{\text{м}} = ns\gamma\kappa_{\text{у}}, \text{ кг/км}, \tag{5.60}$$

где $n$ — число проволок, образующих жилу; $s$ — поперечное сечение проволоки, мм²; $\gamma$ — удельный вес материала проводника, кГ/мм²; $\kappa_{\text{у}}$ — общий коэффициент укрутки.

Учитывая, что для применяемых на местных телефонных сетях кабелей $n=1$, $\gamma=8{,}89$ кг/мм², $\kappa_{\text{у}}=1{,}022$, получим

$$g_{\text{м}} = 1\cdot\frac{\pi d^2}{4}\,8{,}89\cdot 1{,}022 = 2{,}27\,\pi d^2, \text{ кг/км}, \tag{5.61}$$

где $d$ — диаметр токоведущей жилы, мм.

Так как в кабеле имеется $2v$ жил, где $v$ — емкость кабеля, выраженная в парах, получим следующее выражение для расхода меди на один километр кабеля:

$$G_{\text{к}} = 2v\,g_{\text{м}} = 2v\cdot 2{,}27\,\pi d^2 = 14{,}3\,vd^2, \text{ кг/км}. \tag{5.62}$$

Как выше было показано, диаметр жилы кабеля может быть определен по ф-лам (5.55) и (5.56). Поэтому окончательно для кабелей с диаметром жил 0,4—0,7 мм имеем

$$G_{\text{м}_0} = 3{,}35\,\frac{vl^2}{A^2} + 1{,}65\,\frac{vl}{A} + 0{,}2v, \text{ кг/км}. \tag{5.63}$$

Таблица 5.20

КОЭФФИЦИЕНТЫ КВАДРАТИЧНОЙ ФОРМЫ ЗАВИСИМОСТИ СТОИМОСТИ 1 КМ КАБЕЛЕЙ МЕСТНОЙ СВЯЗИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ, ТЫС. РУБ., ОТ ИХ ЕМКОСТИ, ВНЕШНЕГО ДИАМЕТРА И МАССЫ

| Тип кабелей | Аргумент функции цены | Диаметр жил кабеля $d$, мм | Коэффициенты линии регрессии | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $a_0$ | $a_1$ | $a_2 \cdot 10^{-4}$ |
| Парные бронированные ТБ | Емкость кабеля $v$ | 0,4 | 0,460 | 0,013 | -0,042 |
| | | 0,5 | 0,526 | 0,012 | —0,000 |
| | | 0.7 | 0,528 | 0,024 | 0.041 |
| | Диаметр кабеля $D$ | 0,4 | —0,005 | —0,013 | 28 |
| | | 0,5 | 0,811 | 0,059 | 28 |
| | | 0,7 | —0,37 | 0,021 | 18,8 |
| | Масса кабеля, $G$ | 0,4 | —0,027 | 0,786 | 497 |
| | | 0,5 | 0,049 | 0,656 | 216 |
| | | 0,7 | —0,004 | 0,733 | 186 |
| Парные в свинцовой оболочке ТГ | Емкость кабеля $v$ | 0,4 | 0,254 | 0,010 | 0,008 |
| | | 0,5 | 0,253 | 0,020 | —0,017 |
| | | 0,7 | 0,330 | 0,023 | 0,043 |
| | Диаметр кабеля $D$ | 0,4 | 0,069 | 0,016 | 21 |
| | | 0,5 | 0,135 | 0,028 | 20 |
| | | 0,7 | —0,015 | 0,009 | 20 |
| | Масса кабеля $G$ | 0,4 | 0,072 | 1,117 | 229 |
| | | 0,5 | 0,067 | 0,896 | 9,8 |
| | | 0,7 | 0,016 | 0,954 | 15 |
| Парные и четверочные в полиэтиленовой оболочке ТПП | Емкость кабеля $v$ | 0,4 | 0,088 | 0,009 | —0,016 |
| | | 0,5 | 0,101 | 0,009 | —0,017 |
| | | 0,7 | 0,110 | 0,015 | —0,015 |
| | Диаметр кабеля $D$ | 0,4 | —0,034 | 0,045 | 15,1 |
| | | 0,5 | -0,008 | 0,003 | 11,8 |
| | | 0,7 | 0,152 | —0,012 | 13,3 |
| | Масса кабеля $G$ | 0,4 | 0,007 | 1,9 | 513 |
| | | 0,5 | 0,035 | 1,38 | —112 |
| | | 0,7 | 0,013 | 1,22 | —58 |
| Парные и четверочные в поливинилхлоридной оболочке ТПВ | Емкость кабеля $v$ | 0,4 | 0,099 | 0,009 | —0,015 |
| | | 0,5 | 0,115 | 0,010 | -0,018 |
| | | 0,7 | 0,134 | 0,018 | —0,034 |
| | Диаметр кабеля $D$ | 0,4 | 0,020 | 0,003 | 16 |
| | | 0,5 | —0,009 | 0,003 | 13 |
| | | 0,7 | 0,025 | 0,131 | 0,2 |
| | Масса кабеля $G$ | 0,4 | 0,009 | 1,75 | —54,6 |
| | | 0,5 | 0,028 | 1,39 | —26,2 |
| | | 0,7 | 0,237 | —0,16 | 1550 |

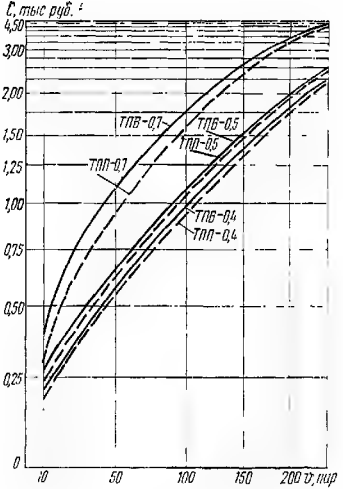



Рис. 5.19. Линейная форма зависимости стоимости кабелей связи типов ТПП, ТПВ от их емкости

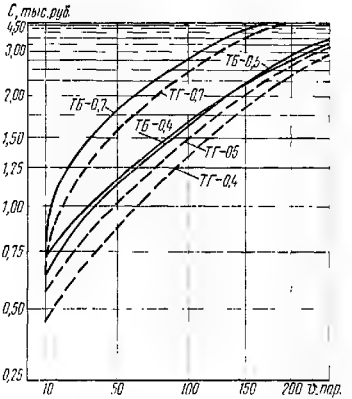



Рис. 5.20. Линейная форма зависимости стоимости кабелей связи типов ТГ, ТБ от их емкости

Если конструкция кабеля задана и километрическое затухание кабеля равно $\alpha = A/l$, то

$$G_{м_0} = 3{,}35\frac{\tau l^2}{\alpha^2} + 1{,}65\frac{vl}{\alpha} + 0{,}2v \text{ кг/км}. \qquad (5.63')$$

*Масса свинца.* Для кабелей со свинцовой оболочкой формула, позволяющая рассчитать массу свинца, может быть получена в предположении, что свинцовая оболочка представляет собой круговое кольцо с внешним диаметром $D_{св}$ и внутренним диаметром $D_{пс}$. Площадь такого кольца, как известно, определяется по формуле

$$S = \frac{\pi}{4}\left(D_{св}^2 - D_{пс}^2\right), \text{ мм}^2.$$

Учтя, что $D_{св} = D_{пс} + 2\delta$, где $\delta$ — толщина свинцовой оболочки, мм, получим

$$S = \pi (D_{пс} + \delta)\,\delta, \text{ мм}^2.$$

Масса 1 км свинцовой оболочки

$$G_{св} = S\,\gamma_{св}\,\kappa_{оп}, \text{ кг/км}, \qquad (5.64)$$

где $\gamma_{св} = 11{,}4$ — удельная масса свинца; кг/мм²; $\kappa_{оп} = 1{,}05$ — коэффициент опрессовывания. Отсюда

$$G_{св} = 37{,}6\,(D_{пс} + \delta)\,\delta, \text{ кг/км}. \qquad (5.65)$$

Выразим толщину свинцовой оболочки $\delta$ в зависимости от $D_{пс}$. Из курса сопротивления материалов известно, что из соображений обеспечения требуемой механической прочности оболочки при условии приложения к ней равномерного избыточного давления

$$\delta = A_\delta\,D_{пс} + B_\delta, \text{ мм},$$

где $A_\delta$ — коэффициент пропорциональности, учитывающий механические свойства материала оболочки; $B_\delta$ — коэффициент, учитывающий необходимый запас прочности на возможные царапины оболочки при протягивании кабеля, утонышении при изгибах и т. д.

Методом наименьших квадратов устанавливаем, что

$$\delta = 0{,}032\,D_{пс} + 1{,}03, \text{ мм}. \qquad (5.66)$$

Подставив (5.66) в (5.65), получим

$$G_{св} = 1{,}24\,D_{пс}^2 + 41{,}3\,D_{пс} + 40{,}1, \text{ кг/км}. \qquad (5.67)$$

Таким образом, масса свинца полностью определяется диаметром кабеля под свинцовой оболочкой. Выразим этот диаметр как функцию емкости кабеля и диаметра токоведущей жилы. Диаметр кабеля под свинцовой оболочкой можно представить в виде

$$D_{пс} = D_{кс} + 2\,\delta_{п\,из}, \text{ мм}, \qquad (5.68)$$

где $D_{кс}$ — диаметр кабельного сердечника, мм; $\delta_{п\,из}$ — толщина поясной изоляции, накладываемой поверх кабельного сердечника под свинцовой оболочкой, мм.

Диаметр кабельного сердечника подсчитывается по формуле

$$D_{кс} = 2\,(v - 1)\,d_г + d_ц, \text{ мм}, \qquad (5.69)$$

где $v$ — число повивов кабеля; $d_г$ — диаметр группы (пары, четверки), мм; $d_ц$ — диаметр центрального повива, мм.

Известно, что число повивов в кабеле определяется выражением

$$v = -\frac{v_0 - 3}{6} + \sqrt{\frac{(v_0 - 3)}{36} + \frac{v}{3}}, \qquad (5.70)$$

где $v_0$ — число групп в центральном повиве, которое для кабелей с правильной повивной скруткой находится в пределах от 0 до 6 (примерно $v_0=3$); $v$ — емкость кабеля, выраженная в парах. При $v_0=3$

$$v = \sqrt{\frac{v}{3}}. \qquad (5.70')$$

Диаметр центрального повива определяется из соотношения

$$d_{\text{ц}} = \left(1 + \frac{1}{\sin\frac{180^\circ}{v_0}}\right) d_{\text{г}}, \text{ мм}. \qquad (5.71)$$

При $v_0=3$

$$d_{\text{ц}} = 2{,}15\, d_{\text{г}}, \text{ мм}. \qquad (5.71')$$

Диаметр группы

$$d_{\text{г}} = \kappa_{\text{к}}\, d, \text{ мм}, \qquad (5.72)$$

где $\kappa_{\text{к}}$ — конструктивный коэффициент, равный для парных кабелей 3,3, а для четверочных — примерно 3,6; $d$ - диаметр токоведущей жилы, мм.

Подставляя (5.70'), (5.71'), (5.72) в (5.69), имеем:

$$D_{\text{кс}} = (1{,}15\sqrt{v} + 2{,}3)\,\kappa_{\text{к}}\, d_0, \text{ мм}, \qquad (5.69')$$

и

$$D_{\text{пс}} = (1{,}15\sqrt{v} + 2{,}3)\,\kappa_{\text{к}}\, d_0 + 2\,\delta_{\text{п из}}, \text{ мм}. \qquad (5.68')$$

Учитывая, что величины $\kappa_{\text{к}}$ и $\delta_{\text{п из}}$ зависят от типа кабеля, это выражение представим в виде

$$D_{\text{пс}} = A_\delta \sqrt{v}\, d + B_\delta, \text{ мм},$$

где коэффициенты $A_\delta$ и $B_\delta$ находятся методом наименьших квадратов, применение которого дает

$$D_{\text{пс}} = 3.86\sqrt{v}\, d + 0{,}535, \text{ мм}. \qquad (5.73)$$

Подставив полученное выражение $D_{\text{пс}}$ в ф-лу (5.67), получим окончательно

$$G_{\text{св}} = 18{,}5\, v d^2 + 165\sqrt{v}\, d + 63{,}3, \text{ кг/км}. \qquad (5.74)$$

Формула (5.74) выведена как для парных (ТГ), так и четверочных (ТЗГ) небронированных кабелей и дает ошибку, как правило, менее 5%. Для получения более точных результатов целесообразно использовать две формулы — отдельно для парных и четверочных кабелей. С этой целью были проведены соответствующие корреляционные расчеты (только для выпускаемых марок кабелей), данные которых сведены в табл. 5.21.

Таким образом, с достаточной степенью точности для парных кабелей ТГ

$$G_{\text{св ТГ}} = 18{,}8\, v d^2 + 163\sqrt{v}\, d + 64{,}5, \text{ кг/км}, \qquad (5.75)$$

и для четверочных кабелей ТЗГ

$$G_{\text{св ТЗГ}} = 18{,}6\, v d^2 + 163\sqrt{v}\, d + 66{,}8, \text{ кг/км}. \qquad (5.76)$$

В разных источниках указываются несколько различные значения массы свинца для отдельных марок кабелей. Поэтому в некоторых случаях могут иметь место и такие приближения:

$$G_{\text{св ТГ}} = 15{,}9\, v d^2 + 196\sqrt{v}\, d - 35{,}3, \text{ кг/км}; \qquad (5.75')$$

$$G_{\text{св ТЗГ}} = 19{,}4\, v\, d^2 + 159\sqrt{v}\, d + 114, \text{ кг/км}. \qquad (5.76')$$

Таблица 5,21

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МАССЫ СВИНЦА, КГ, ОТ $\sqrt{vd}$ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ ТИПОВ ТГ И ТЗГ ($v$ - В ПАРАХ, $d$ — В ММ)

| Характеристика | Кабели типов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ТГ | | ТЗ | |
| | линейная форма | квадратичная форма | линейная форма | квадратичная форма |
| Количество рассмотренных значений емкостей кабелей | 40 | | 54 | |
| Диаметры жил | 0,4; 0,5; 0,7 | | 0,8; 0,9; 1,2 | |
| Коэффициент корреляции | 0,988 | — | 0,498 | — |
| Корреляционное отношение | | 0,999 | — | 0,999 |
| Дисперсия | $0,15 \cdot 10^6$ | 1590 | $8 \cdot 10^6$ | 56 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 36,5 | 0,56 | 23,0 | 0,08 |
| Коэффициенты линии регрессии: | | | | |
| $a_0$ | -804 | 64,5 | 823 | 66,8 |
| $a_1$ | 486 | 163,2 | 504 | 163.2 |
| $a_2$ | – | 18,8 | – | 18,6 |

Корреляционные отношения зависимостей, выраженные ф-лами (5.75′) и (5.76′), соответственно равны 0,998 и 0,984, а средние ошибки аппроксимации — 5,1 и 7,4%.

*Зависимость массы кабеля от массы меди и свинца.* Как было показано выше, стоимость кабеля может быть представлена как функция его массы. Поэтому представляет определенный интерес установить для кабелей в свинцовой оболочке (ТГ, ТЗГ) зависимость между общей массой и суммарной массой меди и свинца. Для кабелей ТГ с диаметром жил 0,4 и 0,5 мм, например, получены следующие корреляционные формулы:

$$G = 1,11 (G_м + G_{св}) + 0,086, \text{ т/км}; \quad (5.77)$$

$$G = 0,00367 (G_м + G_{св})^2 + 0,00735 (G_м + G_{св}) - 0,034, \text{ т/км}; \quad (5.78)$$

$$G = 0,000120 (G_м + G_{св})^3 + 0,00155 (G_м + G_{св})^2 + 1,08 (G_м + G_{св}) + 0,041, \text{ т/км}. \quad (5.78′)$$

Коэффициент линейной корреляции ф-лы (5.77) и корреляционные отношения ф-лы (5.78) и (5.78′) выше 0,999; средние ошибки аппроксимации соответственно равны 2,58; 1,15 и 1,25%, дисперсии — 0,00695, 0,00543 и 0,00542. Это свидетельствует об отличной применимости приведенных формул.

*Зависимость цены кабеля от массы и внешнего диаметра.* Если рассматривать две группы небронированных кабелей (в свинцовой и песвинцовой оболочках), то можно получить приближенные формулы, связывающие цену кабеля с его массой и внешним диаметром. Были рассмотрены линейная и квадратичная формы этих зависимостей. Данные корреляционных расчетов сведены в табл. 5.22 и 5.23.

Таблица 5.22

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНЫ КАБЕЛЕЙ, ТЫС. РУБ., ТИПОВ ТГ, ТПП И ТПВ ОТ МАССЫ $G$, Т

| Характеристика | Кабели типов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ТГ | | ТПП, ТПВ | |
| | линейная форма | квадратичная форма | линейная форма | квадратичная форма |
| Количество рассмотренных значений емкостей кабелей | 60 | | 68 | |
| Коэффициент корреляции | 0,952 | – | 0,950 | — |
| Корреляционное отношение | | 0,952 | | 0,951 |
| Дисперсия | 0,880 | 0,877 | 0,323 | 0,316 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 17,3 | 15,4 | 46,4 | 36,2 |
| Коэффициенты линии регрессии: | | | | |
| $a_0$ | 0,115 | 0,0326 | 0,258 | 0,177 |
| $a_1$ | 0,899 | 0,956 | 1,29 | 1,46 |
| $a_2$ | — | —0,0052 | — | —0,0396 |

Таблица 5.23

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНЫ КАБЕЛЕЙ, ТЫС. РУБ., ТИПОВ ТГ, ТИП И ТПВ ОТ ВНЕШНЕГО ДИАМЕТРА КАБЕЛЯ $D$, ММ

| Характеристика | Кабели типов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ТГ | | ТПП, ТПВ | |
| | линейная форма | квадратичная форма | линейная форма | квадратичная форма |
| Коэффициент корреляции | 0,927 | – | 0,973 | — |
| Корреляционное отношение | – | 0,931 | — | 0,987 |
| Дисперсия | 1,32 | 1,25 | 0,176 | 0,0825 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 41,1 | 28,9 | 69,7 | 18,2 |
| Коэффициенты линии регрессии: | | | | |
| $a_0$ | —1,99 | —0,982 | —1,18 | —0,278 |
| $a_1$ | 0,157 | 0,0912 | 0,0953 | 0,0277 |
| $a_2$ | | 0,00083 | — | 0,00092 |

Из таблиц следует, что квадратичные формы зависимости дают удовлетворительные результаты. Поэтому в качестве расчетных могут быть использованы формулы:

а) для кабелей типа ТГ:

$$C = 0{,}0326 + 0{,}9567G - 0{,}0052G^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.79)$$

$$C = -0{,}982 + 0{,}0912D + 0{,}00083D^2, \text{ тыс. руб.}; \quad (5.80)$$

б) для кабелей типов ТПП и ТПВ:

$$C = 0{,}177 + 1{,}46G - 0{,}0396G^2, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.81)$$

$$C = -0{,}278 + 0{,}0277D + 0{,}00092D^2, \text{ тыс. руб.} \quad (5.82)$$

В ф-лах (5.79)—(5.82) масса кабелей $G$ выражена в тоннах, а диаметр кабеля $D$ — в миллиметрах.

Квадратичные формы зависимости цены бронированных кабелей типа ТБ от их массы и внешнего диаметра имеют вид:

$$C = 0{,}040 + 0{,}73G_{\text{ТБ}} + 0{,}014G^2_{\text{ТБ}}, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.83)$$

$$C = 0{,}080 - 0{,}00456D_{\text{ТБ}} + 0{,}0021D^2_{\text{ТБ}}, \text{ тыс. руб.} \quad (5.84)$$

Корреляционные отношения равны соответственно 0,998 и 0,993, дисперсии — 0,022 и 0,064 и средние ошибки аппроксимации — 5,62 и 8,68%.

*Эксплуатационные расходы сети линейных сооружений.* Общая величина годовых эксплуатационных расходов на обслуживание системы производственной связи, отдельные статьи этих расходов




Рис. 5.21. Квадратичные формы зависимости годовых эксплуатационных расходов на обслуживание всей системы производственной связи от протяженности кабельных линий и телефонной канализации

и численность службы связи, в зависимости от показателей, характеризующих сети линейных сооружений, может быть представлена полиномом вида (5.17). В качестве показателей выбраны: ко-

личество кабеля в фондовом исчислении (километров пятидесятипарного кабеля) $F$, а в физическом исчислении $F'$ (километров); протяженность телефонной канализации $K_т$ (канало-километров). Данные, характеризующие указанные зависимости, приведены в табл. 5.24. Графически они представлены на рис 5.21. Ошибки ап-

Таблица 5.24

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ, ТЫС. РУБ., И ЧИСЛЕННОСТИ СЛУЖБЫ СВЯЗИ, ЧЕЛ., ОТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СЕТИ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ

| Функция $y$ | Аргумент $x$ | Коэффициенты линии регрессии | | | Корреляционное отношение |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $a_0$ | $a_1$ | $a_2 \cdot 10^{-4}$ | |
| Общая величина годовых эксплуатационных расходов $Э$ | Количество кабеля в фондовом исчислении $F$, км | 124 | 1,11 | —2,2 | 0,85 |
| | То же, в физическом исчислении $F'$, км | 84,9 | 2,27 | —3,9 | 0,87 |
| | Протяженность телефонной канализации $K_т$, кан.-км | 108 | 3,54 | —49 | 0,81 |
| Величина годовых расходов на заработную плату с начислениями $э_2$ | Количество кабеля в физическом исчислении $F'$ км | 81,1 | 1,86 | —30 | 0,76 |
| Величина амортизационных отчислений $э_3$ | То же | —274 | 6,17 | —225 | 0,76 |
| Годовые расходы на материалы и запасные части $э_4$ | » | 409 | 9,01 | —347 | 0,76 |
| Прочие производственные затраты $э_5$ | » | —1720 | 29,4 | —1080 | 0,76 |
| Численность службы связи | Количество кабеля в фондовом исчислении $F$, км | 285 | —0,688 | 8 | 0,99 |
| | То же в физическом исчислении $F'$, км | 170 | —0,249 | 13,3 | 0,95 |
| | Протяженность телефонной канализации $K_т$, кан.-км | 174 | —0,493 | 30 | 0,98 |

проксимации зависимостей, коэффициенты которых приведены в табл. 5.24, как правило, не превышают 10%.

Существует корреляционная связь между показателями, характеризующими сети линейных сооружений, и месячным количеством повреждений в системе производственной связи. Корреляционные

отношения квадратичных форм этих зависимостей выше 0,7. Обозначим количество повреждений в месяц через $\Phi$. Тогда:

$$\Phi = 85{,}3 + 0{,}5F + 0{,}000026F^2; \tag{5.85}$$

$$\Phi = 77{,}7 + 1{,}66F' - 0{,}0014(F')^2; \tag{5.86}$$

$$\Phi = 72{,}7 + 2{,}28K_т - 0{,}0043K_т^2. \tag{5.87}$$

Корреляционное отношение ф-лы (5.85) равно 0,93.

Полученные формулы корреляционных зависимостей могут быть приведены к более удобному виду, если выражения (5.16)—(5.18) записать как:

$$y = a_0 + a_1(x - \bar{x});$$

$$y = a_0 + a_1(x - \bar{x}) + a_2(x - \bar{x})^2;$$

$$y = a_0 + a_1(x - \bar{x}) + a_2(x - \bar{x})^2 + a_3(x - \bar{x})^3,$$

где $\bar{x}$ — среднее значение аргумента. Коэффициенты с одним и тем же индексом в приведенных трех формулах ($a_0$, $a_1$, $a_2$ и $a_3$) будут по-прежнему не равны между собой, но очень близки по величине друг к другу. Это позволит сделать рассматриваемые корреляционные зависимости более наглядными.

# ГЛАВА ШЕСТАЯ

## *Определение состава систем производственной связи*

### 6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предыдущих главах рассматривались системы производственной связи как с точки зрения их механизма их функционирования, так и с позиций величин капитальных и эксплуатационных затрат. Главы 6, 7, 8 отводятся для рассмотрения вопросов состава указанных систем, выбора типа оборудования, схем организации связи. Все эти вопросы в настоящее время находятся в стадии их постановки, поэтому ниже излагаются только некоторые положения применения математических методов для организации систем производственной связи. Учитывая весьма быстрый прогресс в развитии науки и техники производственной связи, а также смежных и математических наук, можно ожидать, что уже в ближайшие годы синтез описываемых систем на основе применения соответствующих математических методов станет таким же обыденным делом, как расчет числа соединительных линий на АТС по таблицам Эрланга - ЦНИИС.

Проведенный выше анализ систем производственной связи позволил установить *критерии эффективности функционирования*. С помощью этих критериев были решены некоторые задачи (загрузка радиосетей, диспетчерских установок и т. д.). Это относится к случаям, когда выбор критерия эффективности не представляет затруднений. Как было показано, с точки зрения функционирования систем производственной связи могут использоваться, по крайней мере, три критерия: 1) математическое ожидание отношения времени собственно передачи информации к общему времени передачи; 2) оперативность связи; 3) надежность структуры.

Критерии эффективности функционирования дают количественную оценку тех сторон процесса доставки информации, которые до сих пор, как правило, описывались только качественно. Если же качество функционирования разных сетей одинаково, то выбор оптимального варианта их построения производится по *экономическим критериям*, к которым относятся, в частности: 1) экономический эффект; 2) экономическая эффективность; 3) приве-

денные затраты. При этом желательно, чтобы экономический эффект и экономическая эффективность были бы как можно больше, а приведенные затраты, наоборот, меньше. В некоторых задачах организации систем производственной связи самостоятельное значение могут иметь величины капитальных и эксплуатационных затрат, численность обслуживающего персонала и некоторые другие показатели.

Каждый из критериев эффективности функционирования должен быть применен для решения тех задач, которые наиболее полно ими характеризуются. Первый из указанных критериев приготовлен для систем, которые не являются критичными ко времени доставки информации адресату; второй, наоборот, — для систем, время доставки информации в которых является определяющим фактором; третий — для систем, не допускающих срыва передачи информации. В качестве примера рассмотрим использование различных критериев эффективности при проектировании сетей производственной автоматической телефонной связи. В этих сетях величина $E$ — математическое ожидание отношения времени собственно передачи информации к общему времени передачи — чувствительна к факторам, определяющим поведение абонента, пользующегося данной сетью связи (время подхода к телефонному аппарату, ожидание освобождения занятого средства и т. д.). Это позволяет использовать данный критерий для решения задач размещения абонентских устройств и установления регламента пользования ими. Применение указанного критерия, например, для выбора типа оборудования станции неэффективно, так как величина $E$ практически не зависит от типа станции. Расчет числа соединительных устройств на АТС, как правило, выполняется исходя из допустимой величины потерь сообщения, которая функционально связана с величиной оперативности связи. Критерий «надежность структуры» может быть использован при составлении схем группообразования станций, а также при решении ряда задач построения сети. Выбор же типа оборудования станции, схем узлообразования осуществляется по экономическим критериям, как это будет показано в гл. 7 и 8.

Абсолютно эффективной системы (т. е. оптимальной одновременно по всем перечисленным критериям), очевидно, не может быть хотя бы потому, что ряд критериев эффективности является противоречивым. Например, максимум экономической эффективности может не совпадать с минимумом приведенных затрат. Поэтому каждая взятая в отдельности система производственной связи может быть оптимальна только по каким-либо определенным критериям. Для решения сложных задач синтеза прежде всего необходимо установить приоритетность критериев эффективности.

Наиболее полным критерием является экономическая эффективность системы производственной связи, которая определяется по ф-ле (5.4) и принимает наибольшее значение при некотором соотношении достигнутого положительного результата и затрат, требу-

ющихся на строительство системы и поддержание ее в работоспособном состоянии. Если установить такой критерий невозможно, то для решения менее общих задач синтеза в качестве критерия может быть использован отдельно положительный результат от применения системы производственной связи или приведенные затраты. Можно предположить, что для синтеза систем производственной связи будет характерна постановка задач в следующем виде:

«прямая» задача — синтезировать систему производственной связи по минимуму приведенных затрат при условии, чтобы эффективность функционирования по одному из заданных критериев была не ниже заданного уровня;

«обратная» задача — синтезировать систему производственной связи по наибольшей величине заданного критерия эффективности функционирования при условии, чтобы приведенные затраты были не выше заданного уровня.

Имеется несколько уровней синтеза систем производственной связи. Можно синтезировать сеть диспетчерской телефонной связи с одним коммутатором и 10 абонентами и систему связи крупного промышленного предприятия, включающую в себя сотни коммутаторов и десятки единиц другого оборудования. Обладая некоторым методологическим единством, способы осуществления синтеза в данных случаях являются различными. Эта разница остается даже в том случае, если для решения указанных задач используется один и тот же математический аппарат (например, динамическое программирование). Поэтому в данной главе рассматриваются «крупные» вопросы определения состава систем производственной связи, решаемые при планировании развития этих систем, разработки генеральных схем (схем генеральных планов), технико-экономических обоснований и докладов (ТЭО и ТЭД), заявочных спецификаций и т. д. Более точным методам решения отдельных задач синтеза отведены последующие две главы.

К «крупным» вопросам определения состава систем производственной связи относится установление количества абонентов тех или иных сетей связи, а также объема станционных и линейных сооружений, требующихся для включения абонентских линий. В идеальном случае решение этих вопросов исчерпывает полностью задачу синтеза системы.

В настоящее время существуют методы, с помощью которых теоретически возможно полное решение задачи синтеза: прямой перебор вариантов, метод множителей Лагранжа, метод наискорейшего спуска, метод динамического программирования. Однако практически это сделать невозможно из-за трудностей, возникающих при попытке представления положительного эффекта от использования систем производственной связи в количественной форме. Поэтому, признавая перспективность применения иных математических методов в будущем, когда будут созданы для этого надлежащие условия, здесь мы остановимся на корреляционных мето-

дах определения состава систем производственной связи. Корреляционные методы позволяют получить быстрые и близкие к истинным значениям результаты, если допустить, что при рассмотрении достаточно большого количества тех или иных сетей производственной связи средние их характеристики приближаются к желаемым с точки зрения организации производства.

Указанным допущением надлежит пользоваться весьма осторожно, так как, во-первых, количество рассмотренных сетей должно быть действительно достаточным, а во-вторых, необходимо учитывать уровень развития средств производственной связи. Первое обстоятельство требует тщательного анализа надежности полученных результатов, установления факта однородности исходных данных. Второе обстоятельство оставляет место для некоторого субъективизма. Если анализируются данные существующего оснащения предприятий и строек средствами производственной связи, то необходимо тут же указать, является ли это оснащение полным (т. е. все ли потребности системы управления обеспечиваются данными средствами передачи информации) или имеет место дефицит в тех или иных средствах. В том случае, когда в качестве исходных данных рассматривается проектная документация, следует установить, какому уровню оснащения предприятия средствами производственной связи соответствует проект.

Применение корреляционных методов оправдано также тем, что они используются при планировании, как правило, больших количеств средств производственной связи, вследствие чего отклонения, имеющие место в отдельных случаях, взаимно компенсируются.

Как и во всех других случаях использования корреляционных методов, неизбежно возникают проблемы получения необходимого исходного статистического материала и определения требуемой величины точности расчетов.

Допустим, необходимо составить смету на проектирование диспетчерской связи определенного цеха промышленного предприятия, дать соответствующую заявочную спецификацию. Если при этом известно, что в каждом из 100 других аналогичных уже действующих цехов установлено в среднем 12 аппаратов такой связи, то действия проектировщика приобретают уверенность. Ведь в этом случае можно считать, что такое количество аппаратов диспетчерской связи удовлетворяет потребностям данного производства. Поэтому данное число должно быть принято и для проектируемого цеха. В дальнейшем, при детальной разработке проекта, проектировщик системы связи, обладая необходимой информацией об особенностях технологии, размещения оборудования, рабочих мест производственного персонала и т. д., составит схему организации диспетчерской связи цеха, на основе которой определится и число аппаратов диспетчерской связи. Однако, если объем исходной статистической информации при проведении корреляционного анализа будет достаточным, отклонения данных проекта от корреляционных показателей будут незначительными.

Из изложенного следует, что для определения состава системы производственной связи корреляционными методами необходимо иметь данные о соответствии между характером, технологией, объемом производства и количеством тех или иных средств производственной связи. Иными словами, исходный статистический материал для указанных целей должен быть представлен в виде функции $y_i = f(x_j)$, где $y_i$ — количество средств производственной связи $i$-го вида ($i = 1, 2 \ldots$); $x_j$ — показатель, характеризующий производство $j$-го вида ($j = 1, 2 \ldots$). Выбор показателей, характеризующих производство, должен осуществляться в каждом конкретном случае. Как правило, среди них фигурируют: численность работающих на предприятии (так как средствами связи пользуются люди), объем выпускаемой продукции или стоимость строительно-монтажных работ, производственные связи с другими предприятиями и целый ряд других показателей. На практике ограничиваются 1—2 такими показателями, но иногда в рассмотрение необходимо вводить большое число переменных. Обычно такое положение складывается в отраслях, где используются различные технологии производства, различные (принципиально отличные друг от друга) виды технологического оборудования и т. д.

Количество средств производственной связи $y_i$ выражается в единицах, принятых для соответствующих сетей и использованных нами в предыдущих главах — количество аппаратов, усилителей, передающих камер промышленного телевидения и т. п. Из изложенного следует, что исходный статистический материал для проведения корреляционного анализа состава систем производственной связи может быть получен на основе отчетов промышленных предприятий различных отраслей народного хозяйства, об их фактическом оснащении средствами производственной связи, а также на основе проектов, составленных исходя из особенностей технологии основного производства.

Как и при рассмотрении корреляционных зависимостей капитальных и эксплуатационных затрат, будем считать, что аппроксимация исходных статистических данных выбранной линией регрессии будет удовлетворительной, если максимальная ошибка аппроксимации не будет превышать 10%. Однако указанную точность получить не всегда представляется возможным, так как различные предприятия даже одной отрасли могут очень сильно отличаться друг от друга по оснащению средствами связи из-за влияния большого количества самых разнообразных факторов — технологии производства, разбросанности производства, степени развитости общегосударственной сети связи и др. В таких случаях следует вводить новые параметры, характеризующие производство, и разукрупнять собранную статистику, не забывая, конечно, о ее достаточности.

В заключение отметим, что определение состава системы производственной связи корреляционными методами может рассматриваться как приложение методов прогнозирования (см. гл. 2) к

указанным системам. Прогнозирование развития производственной связи осуществляется во времени для одного предприятия, отрасли и по отдельным показателям производства для различных предприятий.

## 6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА СРЕДСТВ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Простейшим способом определения требуемого количества средств связи является применение укрупненных показателей. Существо этого способа заключается в следующем. Выбирается некоторый показатель, который характеризует данное промышленное предприятие и определение которого не составляет большого труда (объем выпускаемой продукции, численность трудящихся и т. п.). На основе анализа соответствующего статистического материала исследуется линейная форма зависимости количества тех или иных средств связи ($y$) от этого показателя, т. е. функция

$$y = a_0 + a_1 x,$$

где $x$ — показатель, характеризующий данное промышленное предприятие; $a_0$, $a_1$ — постоянные коэффициенты.

Если при рассмотрении достаточно большого количества предприятий оказывается, что коэффициент линейной корреляции высок и соблюдается неравенство $a_0 \ll a_1 x$, то коэффициент $a_1$ называется укрупненным показателем количества средств связи на единицу показателя, характеризующего данное промышленное предприятие, и представляет собой отношение

$$a_1 = y/x. \qquad (6.1)$$

Если предположить, что данный показатель известен, то требуемое количество средств связи определяется как $y \approx a_1 x$. Основная сложность такого метода определения количества средств связи заключается в получении величин укрупненных показателей. Укрупненный показатель является производной функции количества средств связи в зависимости от рассматриваемой характеристики предприятия ($x$) и численно равен тангенсу угла наклона прямой $y = a_1 x$ к оси абсцисс ($a_1 = \operatorname{tg} \varphi$). Когда фактические данные $y_i = f(x_i)$ имеют значительный разброс вокруг прямой $y = a_1 x$, то использование укрупненных показателей дает значительную погрешность. Вследствие этого при определении укрупненных показателей главным является установление их надежности.

Целесообразность использования укрупненных показателей возрастает при увеличении масштаба системы связи. Точность результата при расчете количества средств связи с помощью укрупненных показателей в масштабе отрасли значительно выше, чем при использовании их в масштабе отдельных предприятий, и т. д.

Это обстоятельство должно учитываться при практическом применении данного метода.

Рассмотрим на конкретных примерах, в каких случаях используется метод укрупненных показателей.

Предположим требуется установить величины укрупненных показателей для строительных объединений. Наиболее полной характеристикой строительных организаций является объем выполняемых ими строительно-монтажных работ, поэтому будем выводить укрупненные показатели на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ. Для получения необходимого статистического материала, как указывалось выше, могут быть использованы либо данные о фактическом оснащении строительных организаций средствами производственной связи, либо данные проектной документации. Поскольку в настоящее время оснащение строительных организаций средствами производственной связи отстает от их потребностей, используются данные проектов. Были рассмотрены проекты, выполненные пятью специализированными проектными институтами для 17 различных строительных объединений. Результирующие данные в пересчете на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ сведены в табл. 6.1. Величины укрупненных показателей определены как математическое ожидание случайных величин, находящихся в одной строке.

Вначале рассмотрим данные собранной статистики. Как видно, во многих случаях колебания отдельных значений вокруг укрупненного показателя не превышают 10%. Однако имеется ряд значений, которые значительно отличаются от среднего. Необходимо проверить, принадлежит ли сомнительный результат к той же генеральной совокупности, которую составляют другие статистические данные, или же выпадает из нее. Существо такого исследования состоит в том, что определяется вероятность появления в ряде случаев результата, отклоняющегося от своего математического ожидания на величину, меньшую разности $|a_1 - b_k|$, где $a_1$ — математическое ожидание случайной величины, а $b_k$ — сомнительный результат. Если величина $1-\alpha$ мала, то на основании практической невозможности маловероятных событий можно полагать, что сомнительный результат выпадает не случайно, а в силу того, что статистика неоднородна, и поэтому должен быть отброшен.

Для того чтобы определить, будет ли вероятность появления разности $|a_1 - b_k|$ больше или меньше, чем $1-\alpha$, необходимо вычислить величину $z$ по формуле:

$$z = \frac{a_1 - b_k}{\sigma}, \qquad (6.2)$$

где $\sigma$ — среднее квадратичное отклонение, рассчитываемое по данным статистики, и сравнить ее с величиной коэффициента Стьюдента $Z_\alpha$, определяемой по приложению 6 при данном объеме выборки $n$ и вероятности $\alpha$. Поскольку вероятность $1-\alpha$ убывает с увеличением $Z_\alpha$, то при $z > Z_\alpha$ вероятность появления разно-

Таблица 6.1

УКРУПНЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

| Наименование укрупненного показателя | Единица измерения | Количество единиц на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ по строительным объединениям | | | | | | | | | | | | | | | | | | Математическое ожидание величины укрупненного показателя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Главтянжелстрой | Минстрой Латвийской ССР | Минстрой Эстонской ССР | Минстрой Туркменской ССР | Минстрой Молдавской ССР | Воронежское управление строительства | Тамбовское управление строительства | Алтайское управление строительства | Томское управление строительства | Новосибирское управление строительства | Главкокобстрой | Главволгавятстрой | Главверхневолжскстрой | Ивановское управление строительства | Кировское управление строительства | Пермское управление строительства | Главпривольжстрой | | |
| Телефонные аппараты | шт | 14,9 | 12,7 | 10,3 | 13,0 | 14,7 | 12,4 | 12,1 | — | 12,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | | 12,7 |
| Производственные автоматические телефонные станции (монтируемая емкость) | №№ | 17,0 | — | — | 19,8 | 22,7 | 20,3 | 16,1 | — | 16,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | | 18,7 |
| Коммутаторы диспетчерской и директорской телефонной связи | шт. | 1,24 | 2,56 | 3,22 | 2,13 | 2,82 | 2,27 | 2,24 | — | 1,88 | 1,93 | 2,8 | 1,96 | 1,18 | 2,0 | 3,12 | 1,85 | 2,5 | | 2,2 |
| Телефонные аппараты диспетчерской и директорской связи | » | 17,4 | 26,6 | 22,0 | 22,0 | 29,5 | 27,2 | 25,5 | — | — | — | 32,0 | 30,0 | 10,0 | 18,9 | 47,0 | 32,6 | 15,2 | | 25,5 |
| Радиостанции | » | 2,5 | 3,8 | 4,4 | 3,6 | 3,5 | 4,1 | 5,6 | 2,4 | 3,6 | 4,1 | 3,8 | 5,1 | 4,0 | 2,7 | 2,0 | 3,0 | 2,6 | | 3,6 |
| Усилители | » | 0,42 | 1,80 | 0,62 | 0,58 | 0,21 | 0,64 | 0,83 | 0,39 | 0,43 | 0,56 | 0,34 | 0,22 | 0,53 | 0,16 | 0,03 | 0,26 | 0,19 | | 0,47 |
| Магнитофоны | » | 0,44 | 0,91 | 0,15 | 0,63 | 0,10 | 0,32 | 0,14 | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,075 | 0,02 | 0,05 | 0,23 | — | 0,26 | 0,1 | | 0,28 |
| Телеграфные аппараты | » | 0,12 | 0,65 | 0,90 | 0,33 | 0,53 | 0,05 | 0,22 | 0,04 | — | 0,05 | — | 0,37 | 0,16 | 0,27 | 0,15 | 0,26 | 0,75 | | 0,33 |
| Кабель телефонный | 1 км в фондовом исчислении | 1,76 | — | — | 1,76 | 1,95 | 1,21 | 0,97 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | 1,41 |

сти $a_1 - b_k$ будет меньше $1-\alpha$, т. е. практически невозможна, и сомнительный результат должен быть отброшен. В противном случае отклонение результата $b_k$ от математического ожидания случайно и этот результат должен быть учтен в дальнейших расчетах.

Рассмотрим применение описанного метода для оценки сомнительных результатов укрупненных показателей количества телефонных аппаратов прямой связи на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ (строка 4 табл. 6.1). Имеем 14 результатов, размещенных по интервалам с частостями, приведенными в табл. 6.2.

Таблица 6.2

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ ПО ПОЛНОЙ СТАТИСТИКЕ ЧИСЛА ТЕЛЕФОННЫХ АППАРАТОВ ПРЯМОЙ СВЯЗИ НА 1 МЛН. РУБ. СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬНО МОНТАЖНЫХ РАБОТ

| Интервал значений $z^{(i)} \div z^{(i+1)}$ | Количество результатов, попавших в данный интервал $m_i$ | Частость $\overset{\wedge}{p}_i = \frac{m_i}{14}$ | $\overset{\wedge}{p}_i \left[ \frac{z^{(i)} + z^{(i-1)}}{2} \right]$ |
|---|---|---|---|
| 6÷10 | 1 | 0,071 | 0,6 |
| 11÷15 | 0 | 0 | 0 |
| 16÷20 | 3 | 0,213 | 3,8 |
| 21÷25 | 2 | 0,143 | 3,3 |
| 26÷30 | 5 | 0,356 | 10,0 |
| 31÷35 | 2 | 0,143 | 4,7 |
| 36÷40 | 0 | 0 | 0 |
| 41÷45 | 0 | 0 | 0 |
| 46÷50 | 1 | 0,071 | 3,4 |

Суммируя последний столбец табл. 6.2, получаем $a_1 = 25{,}8$. Сомнительными результатами являются наибольшее ($b_1 = 47$) и наименьшее ($b_2 = 10$) значения. Отбросим их и вновь определим математическое ожидание (табл. 6.3).

Таблица 6.3

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ ПО УКОРОЧЕННОЙ СТАТИСТИКЕ ЧИСЛА ТЕЛЕФОННЫХ АППАРАТОВ ПРЯМОЙ СВЯЗИ НА 1 МЛН. РУБ. СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ

| Интервалы значений $z^{(i)} \div z^{(i+1)}$ | Количество результатов, попавших в данный интервал $m_i$ | Частость $\overset{\wedge}{p}_i = \frac{m_i}{12}$ | $p_i \left[ \frac{z^{(i)} + z^{(i+1)}}{2} \right]$ | $\left[ a_1 - \frac{z^{(i)} + z^{(i+1)}}{2} \right]^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 16÷20 | 3 | 0,250 | 4,5 | 56,2 |
| 21÷25 | 2 | 0,167 | 3,8 | 6,2 |
| 26÷30 | 5 | 0,416 | 11,6 | 6,2 |
| 31÷35 | 2 | 0,167 | 5,5 | 56,2 |

Суммирование предпоследнего, последнего столбца табл. 6.3 дает:

$$a_1 = \sum_{k=1}^{8} p_i \left[ \frac{z^{(l)} + z^{(l+1)}}{2} \right] = 25,5;$$

$$(n-1)\sigma^2 = \sum_{k=1}^{4} \left[ a_1 - \frac{z^{(l)} + z^{(l+1)}}{2} \right]^2 = 125.$$

Отсюда среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{125/(12-1)} = 3,22$, величины $z_1$ и $z_2$ будут равны:

$$z_1 = \frac{|a_1 - b_1|}{\sigma} = \frac{|25,5 - 47|}{3,22} = 6,7; \quad z_2 = \frac{|a_1 - b_2|}{\sigma} = \frac{|25,5 - 10|}{3,22} = 4,8.$$

При $\alpha$ 0,999 по приложению 6 находим ($n$ 12) $Z_\alpha = 4,4$. Мы приняли в качестве величины доверительной вероятности $\alpha = 0,999$, исходя из того, что объем имеющейся в нашем распоряжении статистики незначителен. Стремясь использовать для получения укрупненных показателей как можно больше статистических данных, следует увеличивать величину $\alpha$, т. е. расширять доверительный интервал.

Так как $z_1 > Z_\alpha$ и $z_2 > Z_\alpha$, то результаты $b_1$ и $b_2$ должны быть из рассмотрения исключены. С указанной достоверностью ($\alpha = 0,999$) наибольшие значения статистического ряда, остающиеся после отбрасывания результатов $b_1$, $b_2$ ($b_3 = 32,6$; $b_4 = 32,0$), должны быть сохранены, поскольку при $n = 10$ и $\alpha = 0,999$ величина $Z_\alpha = 4,78$, а

$$z_3 = \frac{|a_1 - b_3|}{\sigma} = \frac{|23,5 - 32,6|}{2,43} = 3,74 < Z_\alpha;$$

$$z_4 = \frac{|a_1 - b_4|}{\sigma} = \frac{|23,5 - 32,0|}{2,43} = 3,5 < Z_\alpha.$$

Здесь 23,5 — математическое ожидание рассматриваемой статистики с 10 членами; 2,43 — среднее квадратическое отклонение этой статистики.

Если принять за доверительную вероятность $\alpha = 0,95$, то и эти результаты должны быть также отброшены, поскольку в данном случае $Z_\alpha = 2,2 < z_4 < z_3$. Кроме того, при доверительной вероятности $\alpha$ 0,95 должны быть отброшены также результаты $b_5 = 15,2$; $b_6 = 30,0$; $b_7 = 29,5$; объем статистики при этом сократится до $n = 7$. Однако в наших расчетах, как указывалось выше, принята $\alpha = 0,999$, что позволит нам рассматривать статистику с $n$ 12 результатами. Кроме того, при этой вероятности могут быть сохранены и «выпадающие» результаты по другим строкам табл. 6.1. Данные, характеризующие надежность укрупненных показателей, полученных в табл. 6.1, приведены в табл. 6.4.

В приведенных расчетах коэффициент вариации $v$ определяется как $v = 100\,\sigma/a_1$, а коэффициент $z_\alpha$ по формуле $Z_\alpha = \frac{P}{v}\sqrt{n}$, где $P$ — допустимая точность расчетов, принимаемая равной 10%; $n$ — число результатов (объем выборки); $a_1$ — укрупненный показатель.

Из табл. 6.4 видно, что надежность укрупненных показателей в основном достаточно велика (выше 0,7). Надежность укрупненных показателей числа усилителей, магнитофонов и телеграфных аппаратов неудовлетворительна (всего 0,3—0,4), что не дает возможности их широкого применения. Для увеличения величины надежности необходимо расширить исходный статистический материал.

Таблица 6.4

ДАННЫЕ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

| Наименование оборудования и кабельной продукции | Укрупненный показатель $a_i$ | Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ | Коэффициент вариации $v$, % | Коэффициент $z_\alpha$ | Надежность показателя $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Телефонные аппараты АТС | 12,7 | 1,2 | 9,5 | 2,96 | 0,997 |
| Производственные автоматические телефонные станции (монтированная емкость) | 18,7 | 1,9 | 10,4 | 2,36 | 0,981 |
| Коммутаторы диспетчерской и телефонной связи | 2,2 | 0,6 | 25,0 | 1,64 | 0,899 |
| Телефонные аппараты диспетчерской и директорской связи | 25,5 | 5,2 | 20,4 | 1,70 | 0,911 |
| Радиостанции | 3,6 | 0,90 | 25,0 | 1,64 | 0,899 |
| Усилители | 0,47 | 0,36 | 77,5 | 0,53 | 0,404 |
| Магнитофоны | 0,28 | 0,29 | 105,0 | 0,38 | 0,296 |
| Телеграфные аппараты | 0,33 | 0,25 | 76,5 | 0,53 | 0,404 |
| Кабель телефонный | 1,41 | 0,29 | 20,5 | 1,09 | 0,724 |

Аналогичным образом можно установить укрупненный показатель стоимости строительства системы производственной связи (на 1 млн. стоимости строительно-монтажных работ). Соответствующие расчеты приводят к величинам $C_{\text{общ}}$=20 тыс. руб./1 млн., $C_{\text{обк}}$=9,06 тыс. руб./1 млн., где $C_{\text{общ}}$ — укрупненный показатель общей стоимости строительства системы производственной связи; $C_{\text{обк}}$ — укрупненный показатель стоимости оборудования и кабельной продукции. Надежность этих показателей равна 0,78, коэффициенты вариации рассмотренных массивов статистической информации — порядка 30%.

Результаты, полученные выше, пригодны для укрупненного определения количества средств связи для строительных объединений (министерств строительства, территориальных главных управлений по строительству, областных управлений строительства). Однако попытка применения этих же укрупненных показателей для определения количества средств связи в отдельных строительных организациях не всегда оказывается правомерной. Дело в том, что ряд строительных организаций, имея один и тот же объем строительно-монтажных работ, могут отличаться между собой организационной структурой (количеством подразделений), что сказывается и на требуемом количестве средств производственной связи. Поэтому для строительных трестов и их подразделений наряду с укрупненными показателями, выведенными на 1 млн. руб. стоимости строительно-монтажных работ, должны использоваться укрупненные показатели, выведенные исходя из структуры строительных организаций.

Требуемое количество оборудования подсчитывается по формуле:

$$N_i = N_{тр} + \sum_{i=1}^{n} N_{под\,i}, \qquad (6.3)$$

где $N_i$ — количество оборудования $i$-го вида ($1 \leqslant i \leqslant 9$); $N_{тр}$ — требуемое количество оборудования для аппарата треста, принимаемое по табл. 6.5; $N_{под\,i}$ — требуемое количество оборудования $i$-го

Таблица 6.5

КОЛИЧЕСТВО СРЕДСТВ СВЯЗИ, ШТ., В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

| Наименование укрупненного показателя | Количество средств связи, требуемое для | | | |
|---|---|---|---|---|
| | одного треста (без подразделений) | | строительного управления (управления механизации, автобазы и т. д.) | |
| | количество единиц | надежность показателя | количество единиц | надежность показателя |
| Телефонные аппараты АТС | 23,5 | 0,96 | 12,5 | 0,99 |
| Коммутаторы прямой телефонной связи | 2,56 | 0,99 | 2,32 | 0,99 |
| Телефонные аппараты прямой связи | 53,4 | 0,95 | 21,1 | 0,66 |
| Радиостанции | 3,61 | 0,90 | 7,22 | 0,92 |
| Усилители | — | — | 1,18 | 0,99 |
| Звукозаписывающие приборы | 0,95 | 0,99 | 0,28 | 0,72 |
| Телеграфные аппараты | 0,72 | 0,82 | 0,28 | 0,72 |

вида для одного строительного управления (или приравненного к нему подразделения), принимаемое по табл. 6.5; $n$ — количество подразделений в тресте.

Из сравнения табл. 6.1 и 6.5 следует, что укрупненные показатели, определенные исходя из структуры строительной организации, обладают большей надежностью, чем приведенные в табл. 6.1. Это объясняется значительно большим объемом статистики ($n \leqslant 17$ в табл. 6.1; $n > 59$ в табл. 6.5). Однако данный способ не позволяет установить стоимости строительства системы производственной связи, монтируемую емкость ПАТС и потребность в кабельной продукции, так как эти системы в настоящее время создаются на уровне строительных объединений, т. е. предполагают коллективное использование ПАТС, сетей линейных сооружений и ряда других сетей несколькими строительными организациями.

В качестве другого примера рассмотрим вывод укрупненных показателей для предприятий черной металлургии. В отличие от строительства, в качестве исход-

ного статистического материала здесь использовались не данные проектной документации, а фактическое оснащение металлургических заводов средствами производственной связи. Укрупненные показатели выводились на 1 млн тонн проката и тысячу трудящихся. Исходные статистические данные приведены в табл. 6.6 и 6.7.

Таблица 6.6

ВЕЛИЧИНЫ УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА 1 МЛН. ТОНН ПРОКАТА

| Наименование укрупненного показателя | Единица измерения | Количество единиц по металлургическим комбинатам или заводам | | | | | | Матем. ожидание величины укрупн. показателя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Магнитогорский | Нижнетагильский | «Красный Октябрь» | Орско-Халиловский | Вакусинский | Ашинский | |
| Монтированная емкость ПАТС | ном. | 1032 | 1296 | 1562 | 1121 | 796 | 412 | 1037 |
| Количество телефонных аппаратов ПАТС | шт. | 989 | 902 | 977 | 711 | 607 | 412 | 766 |
| Количество коммутаторов диспетчерской и директорской телефонной связи | » | — | 8,8 | 5,5 | 12,7 | 18,5 | 3,1 | 9,7 |
| Монтированная емкость коммутаторов диспетчерской и директорской телефонной связи | ном. | 386 | 382 | 275 | 357 | 248 | 82 | 288 |
| Количество телефонных аппаратов диспетчерской и директорской телефонной связи | шт. | 238 | 257 | 189 | 251 | 225 | 72 | 205 |
| Количество радиостанций | » | 23,6 | 23,9 | | 21,7 | 3,8 | — | 18,2 |
| Количество центральных усилителей | » | 10,9 | 9,9 | 1,6 | 11,0 | 3,2 | 6,2 | 7,1 |
| Мощность центральных усилителей | кВ·А | 2,1 | — | 0,2 | 2,2 | 1,3 | 0,4 | 1,2 |
| Количество аппаратов ПГС | шт. | 31,4 | 26,5 | 82,8 | — | — | 56,7 | 49,4 |
| Кабель телефонный | 1 км физ. | 52,2 | 32,2 | 25,6 | 52,2 | 17.4 | 10,8 | 31,7 |
| | 1 км фонд. | 103,8 | — | 41,7 | 44,2 | 18,1 | 6,1 | 42,8 |
| Телефонная канализация | кан.-км | 37,3 | — | 50,7 | 10,3 | 5,2 | 0,2 | 20,8 |

Обработка приведенной в табл. 6.6. и 6.7 статистики осуществлена в соответствии с изложенной выше методикой. Полученные при этом результаты сведены в табл. 6.8.

Из табл. 6.8 следует, что при использовании укрупненных показателей более точные результаты получаются, когда аргументом является численность трудящихся. Однако и в этом случае показатели, характеризующие количество радиостанций, мощность центральных усилителей, количество аппаратов ПГС, количест-

Таблица 6.7

ВЕЛИЧИНЫ УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В РАСЧЕТЕ НА 1 ТЫСЯЧУ ТРУДЯЩИХСЯ

| Наименование укрупненного показателя | Единица измерений | Количество единиц по металлургическим комбинатам и заводам | | | | | | | | | | | Математическое ожидание величины укрупненного показателя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Магнитогорский | Западно-сибирский | Череповецкий | Верхне-исетский | Челябинский | Нижне-тагильский | Новолипецкий | Лысьвенский | Выксунский | Омутнинский | Ашинский | |
| Монтированная емкость ПАТС | ном. | 151 | 186 | 140 | 107 | 121 | 148 | 142 | 53 | 111 | 107 | 89 | 123 |
| Количество телефонных аппаратов ПАТС | шт. | 145 | 187 | 120 | 106 | 116 | 103 | 116 | 51 | 84 | 101 | 89 | 111 |
| Количество коммутаторов диспетчерской и директорской телефонной связи | » | — | 2,8 | 1,9 | 2,0 | 2,7 | 1,0 | 1,7 | 2,2 | 2,6 | 2,0 | 0,7 | 2,0 |
| Монтированная емкость коммутаторов диспетчерской и директорской телефонной связи | ном. | 57 | 104 | 74 | 64 | 89 | 44 | 61 | 11 | 34 | 52 | 18 | 55 |
| Количество телефонных аппаратов диспетчерской телефонной связи | шт. | 35 | 62 | 55 | 40 | 58 | 29 | 53 | 9 | 31 | 41 | 16 | 39 |
| Количество радиостанций | » | 3,4 | 5,3 | 3,5 | — | 2,6 | 2,7 | 1,3 | 0,3 | 0,5 | 6,6 | — | 2,9 |
| Количество центральных усилителей | » | 1,6 | 1,7 | 0,9 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | — | 1,3 | 1,1 |
| Мощность центральных усилителей | кВ·А | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | — | — | 0,2 | 0,1 | 0,2 | — | 0,1 | 0,3 |
| Количество аппаратов ПГС | шт. | 4,6 | 0,6 | 11,2 | — | 8,8 | 3,0 | 15,5 | 4,1 | — | 6,6 | 12,2 | 7,4 |
| Кабель телефонный | 1 км физ. | 7,6 | 7,6 | 2,2 | 2,3 | 6,5 | 3,7 | 5,7 | 1,9 | 2,4 | 2,7 | 2,3 | 4,1 |
| | 1 км фонд. | 15,2 | 7,5 | 9,9 | 1,8 | 19,4 | — | 16,6 | 1,6 | 2,5 | 2,5 | 1,3 | 7,8 |
| Телефонная канализация | кан.-км | 5,5 | 9,7 | 1,3 | 0,6 | 5,9 | — | 16,1 | — | 0,7 | 0,4 | 0,1 | 4,5 |

Таблица 6.8

КОЛИЧЕСТВО СРЕДСТВ СВЯЗИ, ТРЕБУЕМОЕ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ И ЧИСЛЕННОСТИ ТРУДЯЩИХСЯ

| Наименование укрупненного показателя | Единица измерения | Объем выпускаемой продукции млн. тонн проката | | | | Численность трудящихся тыс. чел. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | количество единиц $a_1$ | дисперсия $\sigma$ | коэффициент вариации, % | надежность показателя $\alpha$ | количество единиц $a_1$ | дисперсия $\sigma$ | коэффициент вариации, % | надежность показателя $\alpha$ |
| Монтированная емкость ПАТС | ном. | 1040 | 179 | 17,2 | 0,84 | 123 | 11,3 | 9,2 | 0,99 |
| Количество телефонных аппаратов ПАТС | шт. | 766 | 103 | 13,5 | 0,93 | 111 | 11,0 | 9,9 | 0,99 |
| Количество коммутаторов прямой телефонной связи | » | 9,7 | 3,0 | 31,3 | 0,53 | 2,0 | 0,23 | 11,7 | 0,99 |
| Монтированная емкость коммутаторов прямой телефонной связи | ном. | 288 | 51,9 | 18,0 | 0,83 | 55,2 | 8,9 | 16,1 | 0,96 |
| Количество телефонных аппаратов | шт. | 205 | 31,2 | 15,2 | 0,89 | 38,9 | 5,5 | 14,1 | 0,98 |
| Количество радиостанций | » | 18,2 | 5,6 | 30,7 | 0,48 | 2,93 | 0,7 | 25,3 | 0,77 |
| Количество центральных усилителей | » | 7,1 | 1,8 | 25,7 | 0,66 | 1,08 | 0,2 | 14,8 | 0,97 |
| Мощность центральных усилителей | кВ·А | 1,24 | 0,5 | 39,5 | 0,43 | 0,28 | 0,1 | 32,1 | 0,62 |
| Количество аппаратов ПГС | шт. | 49,4 | 15,1 | 30,6 | 0,48 | 7,39 | 1,7 | 23,3 | 0,80 |
| Кабель телефонный | 1 км физ. | 31,7 | 7,8 | 24,6 | 0,68 | 4,08 | 0,7 | 17,9 | 0,94 |
| | 1 км фонд. | 42,8 | 18,9 | 44,2 | 0,39 | 7,83 | 2,3 | 29,9 | 0,71 |
| Телефонная канализация | кан.-км | 20,8 | 11,1 | 53,4 | 0,33 | 4,47 | 1,95 | 43,6 | 0,51 |

бо кабеля в фондовом исчислении и канало-километры телефонной канализации, имеют низкую надежность. Для получения более точных результатов объем статистики по указанным показателям должен быть увеличен.

На предприятиях черной металлургии широко используется система исчисления объема средств связи с помощью условных единиц (см. гл. 9). Зависимость количества условных единиц $Q$ от объема выпускаемой продукции $x_1$ и численности трудящихся $x_5$ может быть выражена следующим образом:

$$Q = -2665 + 5160\,x_1 - 50{,}1\,x_1^2, \text{ ед;}$$

$$Q = -193 + 658\,x_5 - 0{,}244\,x_5^2, \text{ ед.}$$

Корреляционные отношения этих зависимостей соответственно равны 0,99 и 0,82, а средние ошибки аппроксимации — 38,9 и 58,8%. Таким образом, при пользовании корреляционными формулами лучшее приближение получается, когда в качестве аргумента принят объем выпускаемой продукции.

На двух конкретных примерах были рассмотрены вопросы определения величины укрупненных показателей и их надежности в тех случаях, когда исходными данными являются проектная документация или фактическое оснащение промышленных предприятий средствами связи. К сожалению, полученные результаты не могут использоваться на предприятиях других отраслей промышленности и в условиях строительства, отличных от тех, которые были учтены при формировании исходной статистической информации в табл. 6.1. Поэтому для каждой отрасли народного хозяйства или группы родственных предприятий, а также в других случаях, когда удается получить однородный статистический материал, следует определять укрупненные показатели оснащения промышленных предприятий средствами производственной связи, используя описанную выше методику.

В заключение сделаем два существенных замечания. Первое из них касается одного из способов получения меньшего разброса статистических данных вокруг укрупненного показателя, являющегося их математическим ожиданием. Уменьшение указанного разброса в значительной степени повышает надежность укрупненных показателей. Для достижения этого результата целесообразно ввести комплексные показатели, характеризующие промышленное предприятие, например, вида: $x_1' = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 x_1$, $x_5' = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 x_5$. Здесь $\varepsilon_1$ — коэффициент, учитывающий степень автоматизации и механизации технологических процессов на промышленном предприятии; он может быть определен как отношение числа рабочих мест на данном предприятии к математическому ожиданию числа рабочих мест на предприятиях отрасли или рассматриваемой группы; $\varepsilon_2$ — коэффициент разбросанности предприятия, который может быть определен как отношение площади данного предприятия к математическому ожиданию площади предприятий по рассматриваемой статистике; $\varepsilon_3$ — коэффициент развитости общегосударственной сети связи в районе размещения промышленного предприятия, который может быть определен как отношение математического ожидания телефонной плотности общегосударственной сети по городам, где размещаются предприятия, составляющие рассматриваемую статистику, к аналогичной телефонной плотности данного города или района; $x_1$ — объем выпускаемой продукции; $x_5$ — численность работающих на предприятии.

В практических условиях могут использоваться и другие коэффициенты, учитывающие самые различные стороны деятельности промышленного предприятия и оказывающие определенное влияние на развитие средств производственной связи. Эти коэффициенты должны быть подобраны таким образом, чтобы с их увеличением возрастали величины $x_1'$ и $x_5'$, а следовательно, и количество средств производственной связи $y_i$, которое определяется как $y_i = a_{11}x_{11}'$ или $y_i = a_{15}x_5'$, где $a_{11}$ и $a_{15}$ — укрупненные показатели, определенные соответственно исходя из объема выпускаемой про-

дукции и численности работающих на предприятии. Коэффициенты $\varepsilon_i$ равны 1 в том случае, когда условия данного промышленного предприятия не отличаются от средних условий отрасли или рассматриваемой группы предприятий по $i$-му признаку ($i=1, 2, 3 \ldots$); меньше 1, когда эти условия отличаются от средних в направлении, не стимулирующем развитие производственной связи (высокая развитость средств общегосударственной связи, небольшая площадь занимаемой территории и т. п.); больше 1, когда имеет место обратная картина. Можно предполагать, что при использовании достаточного числа подобных коэффициентов разница между укрупненным показателем и отдельными его случайными значениями в пределе будет как угодно мала.

Второе замечание касается рассмотрения укрупненных показателей с позиций математического прогнозирования, когда укрупненные показатели интерпретируются как предельные значения процессов насыщения или пороговые значения процессов замещения. Поэтому важно проводить соответствующий анализ этих значений [170]. Если можно доказать, что полученные величины укрупненных показателей являются предельными, то дальнейшего развития средств производственной связи на предприятии производить не следует. Это имеет место в тех случаях, когда предприятие не может расширяться и не реконструируется, а находящиеся в эксплуатации средства производственной связи полностью отвечают потребностям отлаженного механизма производственных процессов. Если же величины укрупненных показателей являются пороговыми значениями, то следует внимательно рассматривать динамику их изменения по величине и по времени с целью установления характеристик проходящего процесса замещения.

## 6.3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КОММУТИРУЕМЫМИ И НЕКОММУТИРУЕМЫМИ СЕТЯМИ, ПРОВОДНЫМИ И РАДИОСРЕДСТВАМИ

Оптимальное построение системы связи предполагается наличие в своем составе как коммутируемых, так и некоммутируемых сетей. Применение коммутируемых сетей позволяет резко уменьшить расходы на линейные сооружения за счет исключения из состава прямой связи менее ответственных и загруженных абонентов. Некоммутируемые сети увеличивают оперативность связи. Сказанное относится в равной мере как к телефонной, так и к радиосвязи.

Введем в рассмотрение коэффициент, равный отношению числа линий некоммутируемой сети к числу линий коммутируемой сети в составе системы производственной связи, обозначим его $\delta$ и назовем коэффициентом развитости прямой связи, т. е.

$$\delta = \frac{N_{пр}}{N_{ком}}, \qquad (6.4)$$

$N_{пр}$ — количество прямых линий, численно равное: при телефонной связи — сумме задействованных емкостей всех диспетчерских и директорских установок, а также приведенного числа громкоговорителей и абонентских пунктов ПГС; при радиосвязи — количеству радиостанций прямой связи; $N_{ком}$ — количество коммутируемых линий, численно равное: при телефонной связи — сумме задействованных емкостей всех ПАТС, при радиосвязи — задействованной емкости системы автоматизированной радиотелефонной связи.

Если $\delta=0$, то связь осуществляется только с помощью коммутируемой сети; если $\delta\to\infty$, то — только по прямым линиям. На рис. 6.1 представлена примерная зависимость стоимости $П$ строительства системы производственной связи, эффективность ее функционирования $Е$ и их отношения от коэффициента $\delta$. С ростом этого коэффициента величина затрат резко возрастает по закону, близкому к параболе; эффективность функционирования также возрастает. Однако если на начальном участке этот рост весьма заметен, то при некотором значении $\delta$ начинается «область насыщения» — большим приращениям величины $\delta$ соответствуют очень малые приращения $Е$. Поэтому функция $Е/П=f(\delta)$ имеет максимальное значение при $\delta_{макс}$, которое соответствует получению максимальной эффективности на затраченный рубль. Создавать системы производственной связи, имеющие $\delta>\delta_{макс}$, нецелесообразно, так как после максимального значения начинается резкий спад функции $Е/П$ вследствие того, что значительные увеличения затрат не приводят к заметному увеличению эффективности функционирования

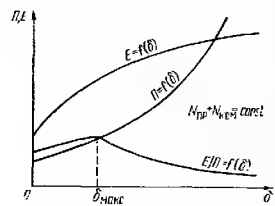


Рис. 6.1. Зависимости стоимости, эффективности функционирования и их отношения от коэффициента $\delta$

Из сказанного следует, что определение величины $\delta$, при которой обеспечивается максимальное значение функции $Е/П$, является важной задачей синтеза систем производственной связи. Аналитическое решение этой задачи чрезвычайно громоздко. Поэтому с целью наиболее быстрого получения оценки величины $\delta_{макс}$ используют корреляционные методы для образования функций $П=f(\delta)$ и $Е=f(\delta)$. Впрочем выражение функции $П=f(\delta)$ может быть получено и на основе корреляционных зависимостей, рассмотренных в гл. 5.

Усредненные величины $\delta$ могут быть определены и путем анализа укрупненных показателей. Например, для строительных организаций, используя данные табл. 6.1, пренебрегая устройствами производственной громкоговорящей связи, можно получить $\delta_{уп}=25{,}5/12{,}7=2{,}0$, где $\delta_{уп}$ — коэффициент развитости прямой свя-

зи, определенный по укрупненным показателям; 25,5 — укрупненный показатель количества телефонных аппаратов прямой связи; 12,7 — укрупненный показатель задействованной емкости ПАТС.

Чтобы учесть устройства производственной громкоговорящей связи при расчете величины $\delta$, необходимо разработать систему приведения этих устройств к телефонным аппаратам прямой связи и АТС. Например, это приведение может быть осуществлено по физическому количеству громкоговорителей и абонентских пунктов ПГС без учета развиваемой ими мощности. От выбранной системы приведения будет зависеть масштаб измерения величины коэффициента $\delta$.

Для предприятий черной металлургии величина коэффициента $\delta_{уп}$ может быть определена по данным табл. 6.8. Обозначим через $\delta'_{уп}$ коэффициент развитости прямой связи, определенный по укрупненным показателям исходя из объема выпускаемой продукции, а через $\delta''_{уп}$ — исходя из численности трудящихся. Тогда $\delta'_{уп} = 205/766 = 0{,}27$ и $\delta''_{уп} = 38{,}9/110{,}6 = 0{,}35$, где 205 и 38,9 — укрупненные показатели количества телефонных аппаратов прямой связи, определенные исходя соответственно из объема выпускаемой продукции и численности трудящихся; 766 и 110,6 — укрупненные показатели задействованной емкости ПАТС в тех же условиях.

Величины $\delta'_{уп}$ и $\delta''_{уп}$ достаточно близки между собой, но значительно меньше аналогичной величины, определенной для строительных организаций. Это объясняется тем, что укрупненные показатели для предприятий черной металлургии рассчитывались по фактическим данным, а для строительных организаций — по проектной документации, в которой более полно учтены их потребности.

Для каждого конкретного предприятия величина $\delta$ может быть легко определена по ф-ле (6.4). Однако знать величину $\delta$ недостаточно для того, чтобы сделать какие-либо выводы об уровне организации производственной связи на предприятии или качестве принятого проектного решения по схеме организации связи. Необходимо сравнить математическое ожидание величины $\delta$ для отрасли или группы родственных предприятий с соответствующей величиной для данного предприятия. Отличие между этими величинами не должно быть существенным (более 5—10%); в противном случае следует пересмотреть организацию связи предприятия, устранив излишества (если величина $\delta$ для данного предприятия была больше) или повысив оперативность (если эта величина была меньше).

Использовать величину $\delta$ можно при проектировании системы производственной связи предприятия и не прибегая к среднеотраслевым ее величинам. Для этого необходимо разработать несколько вариантов схем организации связи и для каждого из них определить величины $E$ и $П$ в соответствии с данными гл. 4 и 5.

Если в состав проектируемой системы входит несколько сетей производственной связи, то эффективность функционирования всей системы может быть определена по формуле:

$$E = \sum_{j=1}^{r} \frac{y_j}{Y} E_j, \qquad (6.5)$$

где $r$ — количество сетей в составе системы связи; $E_j$ — эффективность функционирования $j$-й сети; $y_j$ — нагрузка в чнн, поступающая на $j$-ю сеть; $Y$ — общая нагрузка всей системы в чнн:

$$Y = \sum_{j=1}^{r} y_j. \qquad (6.6)$$

Приведенные затраты на всю систему производственной связи равны сумме приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию всех составляющих ее сетей.

Зная величины $E$ и $П$ для каждого разработанного варианта схемы организации связи, можно построить график, наподобие рис. 6.1, и с его помощью определить $\delta_{макс}$, а следовательно, и соответствующий этой величине вариант схемы организации связи, который будет оптимальным с точки зрения соотношения коммутируемых и некоммутируемых линий.

Кроме установления оптимального соотношения между коммутируемыми и некоммутируемыми линиями при разработке систем производственной связи определяют и оптимальное соотношение между проводными и радиосредствами. Для этого вводится коэффициент $\rho$, представляющий собой отношение числа радиостанций, работающих в составе системы связи, $N_{рс}$ к числу абонентских устройств проводной связи $N_{прв}$, т. е. $\rho = N_{рс}/N_{прв}$. При $\rho=0$ радиосвязь не используется, при $\rho \to \infty$ в составе системы связи применяется только радиосвязь.

Приведенные затраты в зависимости от величины $\rho$ вначале несколько убывают за счет того, что капитальные затраты на строительство радиосетей ниже, чем на строительство сетей проводной связи, а затем имеют тенденцию к возрастанию, главным образом, за счет более высоких эксплуатационных расходов.

Отношение $E/П$ как функция от величины коэффициента $\rho$ имеет общую тенденцию к уменьшению, что объясняет желание абонентов систем производственной связи и персонала, обслуживающего эти системы, пользоваться (когда есть такая возможность) проводными, а не радиосредствами. Однако при некотором (сравнительно небольшом) значении $\rho$ имеется максимум функции $E/П$, размер которого определяется в основном минимумом функции приведенных затрат от величины рассматриваемого коэффициента. Максимальное значение $\rho_{макс}$ соответствует желаемому удельному весу радиостанций в составе системы производственной связи, так как в этом случае будет обеспечено получение максимальной эффективности функционирования на каждый рубль приведенных затрат.

Определить аналитически оптимальное значение $\rho$, так же как и $\delta$, весьма трудно. Для установления корреляционных функций $П=f(\rho)$ и $E=f(\rho)$ требуется весьма большое количество статистического материала, отбор которого является достаточно сложной задачей. Правда, выполнив соответствующие операции с корреляционными функциями, полученными в гл. 4 и 5, можно установить вид зависимости $П=f(\rho)$, но точность полученного результата будет незначительной. Поэтому для определения оптимального значения коэффициента $\rho$ необходимо провести специальные исследования.

Оценка этого значения может быть произведена и по укрупненным показателям. Например, для строительных организаций, пользуясь данными табл. 6.1 и

пренебретая устройствами производственной громкоговорящей связи, получим: $\rho_{уп} = \frac{3,61}{12,7+25,5} = 0,0945$, где $\rho_{уп}$ - значение коэффициента $\rho$, определяемого по укрупненным показателям; 3,61 — укрупненный показатель количества радиостанций; 12,7 — укрупненный показатель количества телефонных аппаратов АТС; 25,5 — укрупненный показатель количества телефонных аппаратов прямой связи.

Таким образом, в строительстве одна радиостанция в среднем должна приходиться примерно на 10 телефонных аппаратов различного назначения.

Пользуясь данными табл. 6.8, можно установить значения коэффициента $\rho_{уп}$ для предприятий черной металлургии: $\rho'_{уп} = \frac{18,2}{766 \mid 205} = 0,0187$ и $\rho''_{уп} = \frac{2,93}{110,6 \mid 38,9} = 0,0196$, где $\rho'_{уп}$ и $\rho''_{уп}$ значения коэффициентов $\rho$, определяемые по укрупненным показателям исходя соответственно из объема выпускаемой продукции и численности трудящихся; 18,2 и 2,93 — укрупненные показатели количества радиостанций в тех же случаях; 766 и 110,6 — укрупненные показатели количества телефонных аппаратов ПАТС; 205 и 38,9 — укрупненные показатели количества телефонных аппаратов прямой связи.

Величины $\rho'_{уп}$ и $\rho''_{уп}$ достаточно близки между собой, поэтому рекомендуется пользоваться не средним их значением, а величиной $\rho''_{уп}$, так как укрупненные показатели, определенные исходя из численности трудящихся, обладают более высокой надежностью. Во всяком случае на предприятиях черной металлургии одна радиостанция приходится примерно на 50 телефонных аппаратов различного назначения

## 6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ ПАТС КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Определение состава систем производственной связи с помощью укрупненных показателей является простейшим и не очень точным способом. Корреляционные методы позволяют получить более близкие к истинным значениям результаты, хотя и в этом случае имеются некоторые отклонения между фактическими и расчетными данными, которые иногда могут достигать заметных величин.

Удельный вес стоимости ПАТС в общей стоимости систем производственной связи весьма заметен. Поэтому более точное определение емкости ПАТС имеет большое значение. Рассмотрим зависимость емкости ПАТС выбранных случайным образом строительных организаций от объема выполняемых ими строительно-монтажных работ и сравним полученные результаты с выводами, сделанными при применении метода укрупненных показателей (табл. 6.9).

Коэффициент линейной корреляции этого статистического ряда равен 0,998. Линейная форма зависимости емкости ПАТС от объема строительно-монтажных работ имеет вид:

$$N_1 = 12,96 + 19x_1. \qquad (6.7)$$

Зависимость емкости ПАТС от величины $x_1$ в квадратичной форме выражается следующим образом:

$$N_1 = 55,2 + 15,7x_1 + 0,0154x_1^2. \qquad (6.8)$$

Корреляционное отношение ф-лы (6.8) равно 0,999. И, наконец, кубическая форма зависимости имеет вид

$$N_1 = 127{,}4 + 7{,}54x_1 + 0{,}164x_1^2 - 0{,}000525x_1^3 . \qquad (6.9)$$

Корреляционное отношение этой формулы 0,999.

Таблица 6.9

СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ ОБЪЕМАМИ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ И ЕМКОСТЬЮ ПАТС СТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЯДА ГОРОДОВ

| Город | Объем строительно-монтажных работ, выполняемых строительными организациями, размещенными в данном городе, млн. руб. | Монтированная емкость ПАТС, номеров |
|---|---|---|
| Унгены | 1,6 | 100 |
| Мары | 3,9 | 200 |
| Бендеры | 15,6 | 300 |
| Бельцы | 16,8 | 300 |
| Тирасполь | 17,4 | 300 |
| Тамбов | 33,3 | 500 |
| Ашхабад | 35,6 | 600 |
| Воронеж | 65,5 | 1200 |
| Кишинев | 71,6 | 1300 |
| Ташкент | 213,4 | 4100 |

Таблица 6.10

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЕМКОСТИ ПАТС ПО РАЗЛИЧНЫМ ФОРМУЛАМ

| Истинное значение емкости | Монтированная емкость ПАТС, определенная по ф-ле | | | Монтированная емкость ПАТС, определенная по укрупненным показателям |
|---|---|---|---|---|
| | (6.7) | (6.8) | (6.9) | |
| 100 | 43 | 80 | 140 | 30 |
| 200 | 87 | 117 | 158 | 73 |
| 300 | 309 | 304 | 283 | 291 |
| 300 | 332 | 323 | 298 | 314 |
| 300 | 344 | 333 | 305 | 325 |
| 500 | 646 | 595 | 540 | 693 |
| 600 | 689 | 634 | 580 | 665 |
| 1200 | 1257 | 1150 | 1177 | 1230 |
| 1300 | 1373 | 1260 | 1315 | 1340 |
| 4100 | 4068 | 4107 | 4140 | 4000 |

В ф-лах (6.7) — (6.9) $x_1$ — объем строительно-монтажных работ, выраженный в млн. руб.; $N_1$ — монтированная емкость ПАТС. Сравним полученные результаты, приняв за истинное значение данные исходной статистики (табл. 6.10).

Из приведенной таблицы видно, что корреляционные формулы дают лучшие приближения к истинным значениям, чем укрупненные показатели, причем с увеличением степени полинома точность аппроксимации возрастает. Данные, полученные в результате расчета по укрупненным показателям, примерно эквивалентны линейной форме корреляционной зависимости. Точность расчетов при использовании полинома второй степени в основном меньше 10% (при емкости ПАТС свыше 300 номеров). Вследствие этого приближение вида (6.8), как правило, приемлемо для проектирования сетей ПАТС строительных организаций. Однако, если необходимо получить большую точность, расчет следует производить по ф-ле (6.9). На емкость ПАТС, обслуживающих потребности строительных организаций, кроме объема строительно-монтажных работ, оказывают влияние также количество этих организаций, территория города, число трудящихся Можно установить связь между емкостью ПАТС и населением города. Обозначим: $x_2$ — количество строительных организаций города; $x_3$ — население города, тыс. чел., $x_4$ — площадь города, кв. км; $x_5$ — численность трудящихся строительных организаций, тыс. чел. Вместо города могут рассматриваться и отдельные его районы. Тогда линейные формы корреляционных зависимостей емкости ПАТС от указанных факторов, полученные на основе обработки соответствующего статистического материала, имеют вид:

$$N_2 = 18{,}7 + 29{,}4x_2; \tag{6.10}$$

$$N_3 = 98{,}7 + 3{,}13x_3; \tag{6.11}$$

$$N_4 = 42{,}6 + 13{,}5x_4; \tag{6.12}$$

$$N_5 = 1040 - 405x_5. \tag{6.13}$$

Коэффициенты корреляции приведенных формул соответственно равны 0,99; 0,98; 0,99 и 0,99.

Квадратичные формы зависимостей выражаются следующими формулами:

$$N_2 = 45{,}7 + 24{,}1x_2 + 0{,}038x_2^2; \tag{6.14}$$

$$N_3 = 201 + 0{,}488x_3 + 0{,}002x_3^2; \tag{6.15}$$

$$N_4 = -383 + 24{,}1x_4 - 0{,}031x_4^2; \tag{6.16}$$

$$N_5 = 96{,}5 + 55{,}3x_5 + 0{,}268x_5^2. \tag{6.17}$$

Корреляционные отношения ф-л (6.14) — (6.17) соответственно равны 0,998; 0,997; 0,997; 0,999.

И, наконец, кубические формы зависимости имеют вид:

$$N_2 = 140 + 8{,}83x_2 + 0{,}465x_2^2 - 0{,}0023x_2^3 ; \quad (6.18)$$

$$N_3 = -2{,}82 + 3{,}32x_3 - 0{,}0045x_3^2 + 0{,}00000363x_3^3 ; \quad (6.19)$$

$$N_4 = -85{,}4 + 7{,}68x_4 + 0{,}184x_4^2 - 0{,}000527x_4^3 ; \quad (6.20)$$

$$N_5 = 152 + 17{,}5x_5 + 2{,}45x_5^2 - 0{,}03x_5^3 . \quad (6.21)$$

Корреляционные отношения ф-л (6.18)—(6.21) выше 0,99.

Практически расчет величины монтируемой емкости ПАТС состоит из следующих этапов:

1) определяют степень полинома корреляционной зависимости;

2) используя выбранные корреляционные зависимости, рассчитывают величины $N_1 - N_5$;

3) определяют ожидаемое значение величины $N$.

Степень полинома корреляционной зависимости устанавливается исходя из условий получения желаемой точности. Как указывалось выше, увеличивая степень полинома, можно добиться любой желаемой точности. Практически для всех рассматриваемых зависимостей особенно заметное увеличение точности происходит при переходе от линейной к квадратичной форме; при дальнейшем увеличении степени полинома точность расчетов возрастает медленнее. Поэтому наибольшее распространение имеют квадратичные формы зависимости. Не малую роль здесь играет и то обстоятельство, что оперировать полиномами второй степени значительно легче, чем полиномами третьей и больших степеней. Конечно, еще проще пользоваться линейными зависимостями, но ошибки аппроксимации этих зависимостей все же весьма велики. Таким образом, квадратичные формы зависимости позволяют получить некоторое компромиссное сочетание — точность не так мала, как при линейных зависимостях, а использовать их много легче, чем кубические зависимости. Однако окончательно степень аппроксимирующего полинома должна выбираться в каждом конкретном случае: допустимо использование линейной зависимости, если достигаемая при ее применении точность отличается от точности получаемой в случае использования квадратичной зависимости менее чем на 10%; необходимо использовать кубические зависимости (и даже полиномы четвертой и более высоких степеней), если точность достигаемой при этом аппроксимации не удовлетворяет условиям решаемой задачи. Сказанное здесь относится не только к зависимостям (6.10) (6.21), но и к последующим корреляционным зависимостям. Выбрав степень аппроксимирующего полинома (например, вторую), по ф-лам (6.8) и (6.14) — (6.17) находим $N_1 - N_5$. Ожидаемое значение емкости ПАТС может быть определено по формуле:

$$N = \sum_{i=1}^{5} \gamma_i N_i, \quad (6.22)$$

где $\gamma_i$ — нормированный удельный вес $i$-го аргумента: $\sum_{i=1}^{5} \gamma_i = 1$.

Нормирование аргументов, например, может быть произведено по величинам корреляционных отношений $r_i$, т. е.

$$\gamma_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^{5} r_i},$$

или по величине точности аппроксимации $P_i$, т. е.

$$\gamma_i = \frac{1 - P_i}{\sum_{i=1}^{5} (1 - P_i)}.$$

Рассмотрим теперь зависимость емкости ПАТС от обслуживаемой ею территории. Емкость ПАТС существенно зависит от степени развитости сетей прямой связи, которая характеризуется величиной $\delta$ (см. разд. 6.3). Если обозначить обслуживаемую ПАТС площадь через $S$ и выражать ее в квадратных километрах, то при разных значениях коэффициента $\delta$ имеем следующие зависимости, полученные путем обработки соответствующего статистического материала:

$$N_S = 24{,}7 + 42{,}7S + 4{,}95S^2; \quad \delta = 0{,}97; \tag{6.23}$$

$$N_S = 94{,}4 + 24{,}0S + 6{,}11S^2; \quad \delta = 1{,}7; \tag{6.24}$$

$$N_S = 117 + 68{,}1S - 2{,}38S^2; \quad \delta = 2{,}12. \tag{6.25}$$

Корреляционные отношения ф-л (6.23) - (6.25) выше 0,99.

Зависимости длины абонентской линии и площади обслуживаемой территории от емкости ПАТС в кубической форме имеют вид:

$$L_{ср} = -1{,}52 + 0{,}019N - 0{,}0000234N^2 + 0{,}00000001N^3, \text{ км}; \tag{6.26}$$

$$L_{аб} = -2{,}08 + 0{,}0313N - 0{,}0000453N^2 + 0{,}00000002N^3; \text{ км}; \tag{6.27}$$

$$S = 0{,}996 - 0{,}0237N - 0{,}0000232N^2 + 0{,}00000001N^3, \text{ км}^2, \tag{6.28}$$

где $L_{ср}$ — средняя длина абонентской линии; $L_{аб}$ — длина абонентской линии до максимально удаленного абонента; $S$ — площадь обслуживаемого ПАТС района.

Квадратичная форма зависимости средней длины абонентской линии от емкости ПАТС (корреляционное отношение - 0,97) имеет вид

$$L_{ср} = 0{,}01 + 0{,}0077N - 0{,}0000021N^2, \text{ км}. \tag{6.29}$$

На рис. 6.2 и 6.3 представлены линейные формы зависимости емкости ПАТС, обслуживающих потребности строительных организаций, от величин $x_1$, $x_2$ $x_3$, $x_4$, а на рис. 6.4 — зависимость средней длины абонентской линии от емкости ПАТС (квадратичная форма).

Квадратичные формы зависимости емкости ПАТС на предприятиях черной металлургии от объема выпускаемой продукции $x_1$

(млн. тонн проката) и количества трудящихся на этих предприятиях $x_5$ (тыс. чел.) имеют вид:

а) для монтированной емкости:

$$N = -8{,}73 + 17{,}06x_1 - 0{,}639x_1^2, \quad (6.30)$$

$$N = -1{,}28 + 1{,}23x_5 + 0{,}0049x_5^2; \quad (6.31)$$

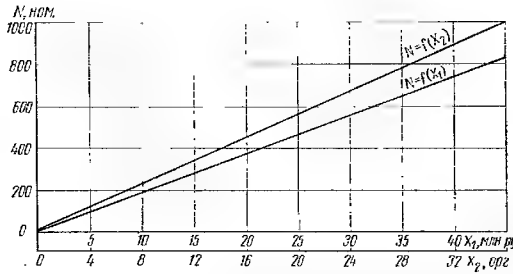
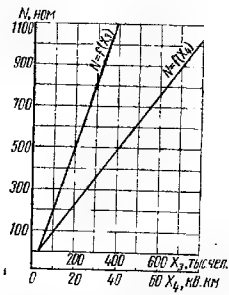



Рис. 6.2. Зависимости емкости ПАТС строительных организаций от объема строительно-моитажных работ и количества строительных организаций в городе (линейные формы)

б) для задействованной емкости:




$$N = -2{,}52 + 8{,}3x_4 + 0{,}2085x_4^2, \quad (6.32)$$

$$N = 1{,}26 + 0{,}785x_5 + 0{,}01x_5^2. \quad (6.33)$$

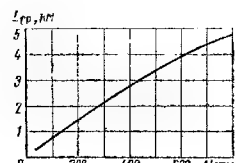



Рис. 6.3. Зависимости емкости ПАТС строительных организаций от населения и площади города (линейные формы)

Рис. 6.4. Зависимости средней длины абонентской линии от емкости ПАТС, обслуживающих потребности строительных организаций

Корреляционные отношения ф-л (6.30) — (6.33) соответственно равны 0,99; 0,97; 0,99 и 0,97, а средние ошибки аппроксимации 27,7; 21,2; 18,6; и 21,3%. Увеличивая объем статистических данных, можно добиться снижения величины ошибок аппроксимации.

Аналогичные зависимости могут быть получены и для других отраслей народного хозяйства.

Сравнение результатов, полученных по ф-лам (6.30) — (6.33), с аналогичными данными по укрупненным показателям приводит к сделанным выше выводам о том, что корреляционные формулы дают более точные совпадения с фактическими данными, чем укрупненные показатели.

## 6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА УСТАНОВОК ПРЯМОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ И УСТРОЙСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ГРОМКОГОВОРЯЩЕЙ СВЯЗИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Как указывалось выше, строительство сетей некоммутируемой производственной связи требует значительных капитальных затрат. Поэтому объем этого строительства должен быть достаточно обоснован. Следует отметить, что каждая отрасль народного хозяйства накладывает соответствующий отпечаток на системы производственной связи вообще и на все ее составляющие части примерно в равной степени. Но особенно отраслевая специфика проявляется именно в организации сетей некоммутируемой связи (как проводной, так и радио).

Рассмотрим корреляционные зависимости количества установок прямой телефонной связи и радиостанций от влияющих факторов на примере систем производственной связи строительных организаций, размещенных в городах республиканского и областного значения. Для других условий корреляционные зависимости должны быть получены на основе обработки соответствующего статистического материала. Обозначим через $n$ — количество установок прямой связи; $n_р$ — количество радиостанций; $x_1$ — объем строительно-монтажных работ, выполняемый всеми строительными организациями в данном географическом пункте, млн. руб; $x_2$ — количество строительных организаций; $x_3$ — количество жителей, тыс. чел.; $x_4$ — площадь города, кв. км; $x_5$ — численность строительных организаций, тыс. чел. Линейные формы рассматриваемых зависимостей имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= 15{,}7 + 1{,}41x_1 \\ n_2 &= 13{,}6 + 2{,}21x_2 \\ n_3 &= 7{,}9 + 0{,}23x_3 \\ n_4 &= 22{,}1 + 0{,}939x_4 \\ n_5 &= 15{,}3 + 5{,}0x_5 \end{aligned}\right\}; \qquad (6.34)$$

$$\left.\begin{aligned} n_{p1} &= 18{,}3 + 2{,}47x_1 \\ n_{p2} &= -20{,}1 + 3{,}79x_2 \\ n_{p3} &= -51{,}6 + 0{,}4x_3 \\ n_{p4} &= -30{,}1 + 1{,}65x_4 \\ n_{p5} &= -34{,}8 + 8{,}8x_5 \end{aligned}\right\}. \qquad (6.35)$$

Коэффициенты линейной корреляции ф л (6.34) и (6.35) соответственно равны 0.98; 0,98; 0,99; 0,93; 0,99; 0,99; 0,98; 0,97; 0,95; 0,99. Графики функций (6.34) (6.35) приведены на рис. 6.5 и 6.6.

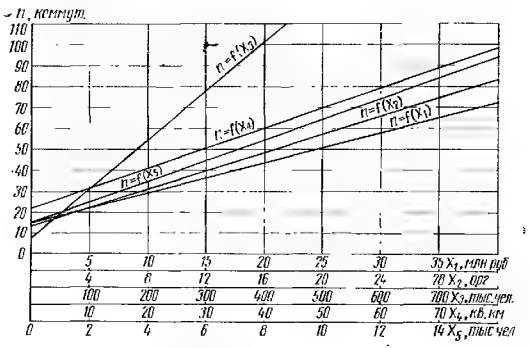



Рис. 6.5. Зависимости количества установок прямой телефонной связи в строительных организациях от влияющих факторов (линейные формы)

В квадратичной форме эти же зависимости выражаются формулами:

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= -3{,}3 + 2{,}45x_1 - 0{,}00486x_1^2 \\ n_2 &= -7{,}8 + 4{,}0x_2 - 0{,}0128x_2^2 \\ n_3 &= 10{,}7 - 0{,}2x_3 + 0{,}000021x_3^2 \\ n_4 &= -51{,}1 + 3{,}2x_4 - 0{,}00666x_4^2 \\ n_5 &= 1{,}55 + 8{,}94x_5 - 0{,}065x_5^2 \end{aligned}\right\}; \qquad (6.36)$$

$$\left.\begin{aligned} n_{p1} &= -6{,}52 + 3{,}65x_1 - 0{,}00539x_1^2 \\ n_{p2} &= 4{,}95 + 5{,}44x_2 - 0{,}0114x_2^2 \\ n_{p3} &= -12{,}5 + 0{,}97x_3 - 0{,}000434x_3^2 \\ n_{p4} &= -81{,}4 + 4{,}71x_4 - 0{,}00884x_4^2 \\ n_{p5} &= 13{,}3 + 13{,}6x_5 - 0{,}0816x_5^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (6.37)$$

Корреляционные отношения приведенных формул выше 0,99. Это позволяет получать достаточно точные значения количества коммутаторов и радиостанций, которые должны быть размещены в строительных организациях, работающих в черте города. Получен-

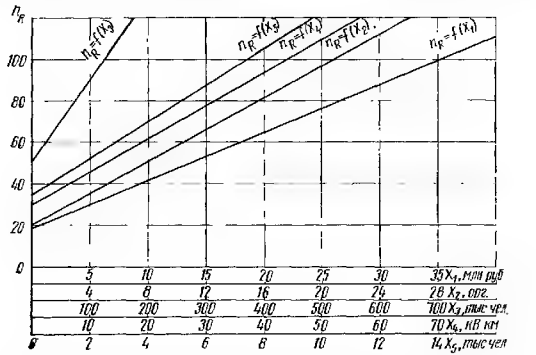



Рис. 6.6. Зависимости количества радиостанций в строительных организациях от влияющих факторов (линейные формы)

ные при расчетах по ф-лам (6.34) — (6.37) результаты должны быть округлены до ближайшего большего целого. Ожидаемые величины $n$ и $n_р$ из пяти полученных значений могут быть определены аналогично тому, как в предыдущем разделе была определена ожидаемая емкость ПАТС.

Для предприятий черной металлургии были исследованы зависимости количества коммутаторов прямой связи, их монтированной емкости, а также количества радиостанций от объема выпускаемой продукции $x_1$ (млн. тонн проката) и количества трудящихся $x_5$ (тыс. чел.). Обозначим, как и ранее, монтированную емкость установок прямой связи через $N$. Тогда квадратичные формы указанных зависимостей имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= -44{,}6 + 57{,}5x_1 - 9{,}77x_1^2 \\ n_5 &= -7{,}3 + 3{,}49x_5 - 0{,}0435x_5^2 \end{aligned}\right\}; \tag{6.38}$$

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= -3{,}61 + 5{,}09x_1 - 0{,}092x_1^2 \\ N_5 &= -2{,}59 + 0{,}84x_5 - 0{,}0036x_5^2 \end{aligned}\right\}; \tag{6.39}$$

$$\left.\begin{aligned} n_{р1} &= -65{,}4 + 49{,}0x_1 - 2{,}02x_1^2 \\ n_{р5} &= 30{,}9 - 1{,}15x_5 + 0{,}0668x_5^2 \end{aligned}\right\}. \tag{6.40}$$

Корреляционные отношения приведенных формул соответственно равны 0,95; 0,84; 0,99; 0,89; 0,99; 0,87, а средние ошибки аппроксимации — 30,3; 33,3; 14,2; 73,9; 3,1; 157,7%.

Таким образом, зависимости емкости ПАТС от объема выпускаемой продукции оказываются более точными, чем от количества трудящихся. При выводе укрупненных показателей имело место обратное положение. Последнее можно объяснить, вероятно, малым объемом статистических данных при определении корреляционных зависимостей исходя из объема выпускаемой продукции. Поэтому, несмотря на более низкие корреляционные отношения и высокие ошибки аппроксимации, более надежными являются все же формулы, в правой части которых фигурирует величина $x_5$.

Для предприятий черной металлургии выведены корреляционные зависимости между количеством условных технических единиц $Q$ в составе системы межпроизводственной связи (см. гл. 9) и количеством коммутаторов и радиостанций:

$$Q = 1420 + 357n - 1{,}28n^2, \text{ ед.;} \qquad (6.41)$$

$$Q = 9420 + 94{,}1n_р + 0{,}24n_р^2, \text{ ед.} \qquad (6.42)$$

Корреляционные отношения этих формул равны 0,65 и 0,93.

## 6.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА СТРОИТЕЛЬСТВА СЕТИ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Объем строительства сети линейных сооружений зависит от значительно большего количества факторов, чем ранее рассмотренные характеристики других сетей производственной связи. Поэтому получить достаточно точные зависимости, характеризующие сети линейных сооружений, очень тяжело. Системы производственной связи, например, двух металлургических заводов с равными объемами выпускаемой продукции, емкостями ПАТС и количеством диспетчерских и директорских установок могут иметь весьма различные характеристики сети линейных сооружений. Никакие из выше рассмотренных зависимостей не поддаются корреляционному описанию с таким трудом, как объем строительства сети линейных сооружений. Очевидно, здесь весьма перспективно использование коэффициентов $\varepsilon_i$, описанных в разд. 6.2. В данном разделе вначале описываются некоторые формы зависимостей требуемого количества кабельной продукции, а затем — телефонной канализации от влияющих факторов.

Требуемый объем кабельной продукции измеряется в фондовом (50-парном) исчислении. Обозначим его через $F$. Факторами, влияющими на количество километров кабеля в фондовом исчислении, являются: емкость ПАТС — $N$; число коммутаторов диспетчерской и директорской связи — $n$; максимальная длина абонентской линии — $L_{аб}$; средняя длина абонентской линии — $L_{ср}$; обслуживаемая территория — $S$ и целый ряд других.

Рассмотрение группы проектов двух специализированных проектных институтов (1 — выполняет проекты для самых различных отраслей народного хозяйства; 2 — для строительства) привело к следующим корреляционным зависимостям (индексы величины $F$ соответствуют номерам проектных институтов):

1) линейная форма:

$$F_1 = -4{,}56 + 0{,}021N; \tag{6.43}$$

$$F_2 = -21{,}6 + 0{,}115N; \tag{6.44}$$

$$F_2 = -18{,}9 + 0{,}953n; \tag{6.45}$$

$$F_1 = -8{,}5 + 8{,}27L_{\text{аб}}; \tag{6.46}$$

$$F_2 = -28{,}1 + 13{,}2L_{\text{аб}}; \tag{6.47}$$

$$F_1 = -50{,}9 + 120L_{\text{ср}}; \tag{6.48}$$

$$F_2 = -21{,}4 + 16{,}4L_{\text{ср}}; \tag{6.49}$$

$$F_1 = -12{,}5 + 4{,}2S; \tag{6.50}$$

$$F_2 = 4{,}5 + 0{,}963S. \tag{6.51}$$

Коэффициенты корреляции для функций $F_1$ равны соответственно 0,99; 0,98; 0,95; 0,95; а для функций $F_2$ — 0,98; 0,95; 0,92; 0,96; 0,99;

2) квадратичная форма:

$$F_1 = -1{,}26 + 0{,}01N + 0{,}00000207N^2; \tag{6.52}$$

$$F_2 = -12{,}8 + 0{,}079N + 0{,}0000265N^2, \tag{6.53}$$

$$F_2 = 5{,}75 - 0{,}093n + 0{,}00707n^2; \tag{6.54}$$

$$F_1 = -1{,}39 + 2{,}5L_{\text{аб}} + 0{,}477L_{\text{аб}}^2; \tag{6.55}$$

$$F_2 = 3{,}86 - 3{,}99L_{\text{аб}} + 1{,}64L_{\text{аб}}^2; \tag{6.56}$$

$$F_1 = 36{,}5 - 159L_{\text{ср}} + 177L_{\text{ср}}^2; \tag{6.57}$$

$$F_2 = -1{,}48 + 2{,}89L_{\text{ср}} + 1{,}54L_{\text{ср}}^2; \tag{6.58}$$

$$F_1 = 0{,}92 - 0{,}555S + 0{,}2S^2; \tag{6.59}$$

$$F_2 = 4{,}52 + 0{,}964S - 0{,}00001S^2. \tag{6.60}$$

Корреляционные отношения для функций $F_1$ выше 0,999, а для функций $F_2$ выше 0,98, но ниже 0,996. На рис. 6.7 графически показаны линейные формы зависимости $F_1$ и $F_2$ от некоторых влияющих факторов. Из рисунка видна значительная разница между функциями, полученными при анализе проектной документации двух проектных институтов. Последнее объясняется и отраслевыми различиями и особенностями проектирования в этих институтах. Зависимость $F_2$ от средней длины абонентской линии оказывается отнесенной далеко вправо. Вследствие этого можно принять, что ф-ла (6.48) может применяться только при значениях $L_{\text{ср}}$ свыше 0,4 и менее 1 км, а ф-ла (6.49) — при $L_{\text{ср}} > 1$ км.

Зависимости $F_1$, несмотря на высокие коэффициенты линейной корреляции, заслуживают небольшого доверия, так как при $N<200N\bar{N}$, $L_{ср}<0{,}4$ км и $S<0{,}3$ км² функция имеет отрицательное значение, что не имеет физического смысла. Накопление статистики может позволить в дальнейшем получить более точные зависимости.

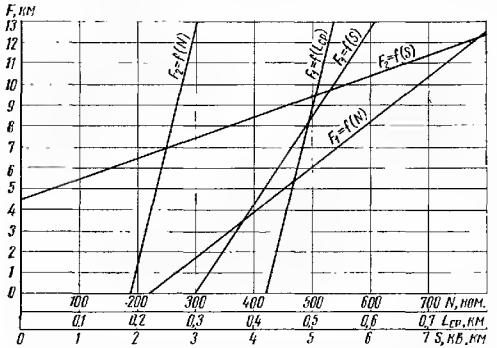



Рис. 6.7. Линейные формы зависимости объема кабельной продукции от емкости ПАТС, средней длины абонентской линии и обслуживаемой территории по данным двух проектных институтов

Учитывая приближенность приведенных формул, использование методики определения ожидаемой величины, изложенной в разд. 6.4 применительно к емкости ПАТС, здесь оказывается наиболее эффективным, так как позволяет учесть надежность каждого результата. Для отдельных отраслей народного хозяйства могут быть получены корреляционные зависимости требуемого количества кабельной продукции непосредственно от факторов, характеризующих сам процесс производства или сопутствующие ему величины. Например, для строительных организаций эти зависимости в обозначениях, использовавшихся нами выше, в квадратичной форме выражаются следующим образом:

$$F = -0{,}17 + 0{,}8x_1 + 0{,}0084x_1^2; \qquad (6.61)$$

$$F = -2{,}03 + 1{,}28x_2 + 0{,}02x_2^2; \qquad (6.62)$$

$$F = 30{,}3 - 0{,}21x_3 + 0{,}00051x_3^2; \qquad (6.63)$$

$$F = -36{,}2 + 1{,}75x_4 + 0{,}00041x_4^2; \qquad (6.64)$$

$$F = -6{,}04 + 1{,}54x_5 + 0{,}142x_5^2. \qquad (6.65)$$

Корреляционные отношения зависимостей (6.61) — (6.65) выше 0,99. В приведенных формулах требуемое количество кабельной продукции выражено в километрах фондового исчисления. Средние ошибки аппроксимации ф-л (6.61) — (6.65) соответственно равны 26,3; 20,5; 165,3; 46,9; 40,6%.

Для предприятий черной металлургии зависимости требуемого количества кабельной продукции в фондовом исчислении от объема выпускаемой продукции и численности трудящихся в квадратичной форме имеют вид:

$$F = -10{,}9 + 19x_1 + 9{,}57x_1^2; \qquad (6.66)$$

$$F = -97 + 15{,}2x_5 + 0{,}033x_5^2. \qquad (6.67)$$

Корреляционные отношения зависимостей (6.66) и (6.67) соответственно равны 0,999 и 0,943, а средние ошибки аппроксимации — 55,1 и 204,7%. Таким образом, и в данном случае зависимости величины $F$ от объема выпускаемой продукции имеют более высокие величины корреляционных отношений.

Квадратичные формы зависимости требуемого количества кабельной продукции в физическом исчислении $F'$ от объема выпускаемой продукции и численности трудящихся на предприятиях черной металлургии выражаются следующим образом:

$$F' = -29{,}4 + 43{,}2x_1 + 1{,}34x_1^2, \text{ км}; \qquad (6.68)$$

$$F' = 10{,}9 + 1{,}04x_5 + 0{,}103x_5^2, \text{ км}. \qquad (6.69)$$

Корреляционные отношения зависимостей (6.68) - (6.69) равны 0,989 и 0,947, а средние ошибки аппроксимации — 25,5 и 50,1%.

Сравнение ф-л (6.66) и (6.67) с (6.68) и (6.69) показывает, что при физическом исчислении кабеля удается получить меньшие величины средних ошибок аппроксимации.

На рис. 6.8 представлены зависимости требуемого количества кабельной продукции от влияющих факторов. Выше объем строительства телефонной канализации обозначался через $K_т$; он исчисляется в канало-километрах. Факторами, влияющими на объем строительства телефонной связи, являются емкость ПАТС, количество коммутаторов прямой телефонной связи, максимальная и средняя длины абонентских линий, площадь, обслуживаемая ПАТС и т. д. Анализ проект-

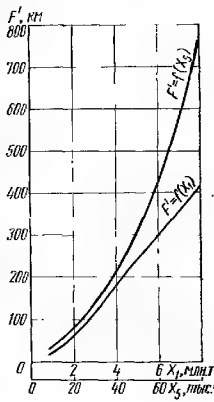



Рис. 6.8. Зависимость объема кабельной продукции по данным Министерства черной металлургии

ной документации тех же двух проектных институтов, которые рассматривались выше, позволил получить следующие корреляционные зависимости (индексы 1 и 2 относятся к проектным институтам):

1) линейные формы:

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= -0{,}687 + 0{,}015N \\ K_{\tau_2} &= -3{,}2 + 0{,}045N \end{aligned}\right\}; \tag{6.70}$$

$$K_{\tau_2} = -1{,}44 + 0{,}384n; \tag{6.71}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= -3{,}7 + 6{,}24L_{аб} \\ K_{\tau_2} &= -12{,}4 + 5{,}28L_{аб} \end{aligned}\right\}; \tag{6.72}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= -35{,}8 + 90{,}9L_{ср} \\ K_{\tau_2} &= -7{,}2 + 6{,}36L_{ср} \end{aligned}\right\}; \tag{6.73}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= -6{,}67 + 3{,}28S \\ K_{\tau_2} &= -1{,}19 + 2{,}56S \end{aligned}\right\}. \tag{6.74}$$

Коэффициенты линейной корреляции соответственно равны: для зависимостей, полученных по данным 1-го института — 0,99; 0,98; 0,95; 0,96, а для зависимостей, полученных по данным 2-го института, — 0,98; 0,99; 0,91; 0,96 и 0,97;

2) квадратичная форма:

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= 2{,}17 + 0{,}00645N + 0{,}00000179N^2 \\ K_{\tau_2} &= -6{,}28 + 0{,}058N - 0{,}00000923N^2 \end{aligned}\right\}; \tag{6.75}$$

$$K_{\tau_2} = -3{,}28 + 0{,}456n - 0{,}00046n^2; \tag{6.76}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= 2{,}02 + 1{,}62L_{аб} + 0{,}381L_{аб}^2 \\ K_{\tau_2} &= 3{,}26 - 3{,}06L_{аб} + 0{,}775L_{аб}^2 \end{aligned}\right\}; \tag{6.77}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= 29{,}9 - 118L_{ср} + 133L_{ср}^2 \\ K_{\tau_2} &= 0{,}37 + 0{,}583L_{ср} + 0{,}657L_{ср}^2 \end{aligned}\right\}, \tag{6.78}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{\tau_1} &= 2{,}23 + 0{,}121S + 0{,}132S^2 \\ K_{\tau_2} &= -2{,}68 + 3{,}95S - 0{,}0659S^2 \end{aligned}\right\}. \tag{6.79}$$

Корреляционные отношения по данным 1-го института выше 0,99, а по данным 2-го института выше 0,98.

На рис. 6.9 приводятся графики зависимости объема строительства телефонной канализации от некоторых факторов (линейные формы) по данным двух институтов. График функ-

ций $T_2=f(L_{ср})$ оказался отнесенным далеко вправо. Из рис. 6.9 следует, что второй проектный институт предусматривает большие объемы строительства телефонной канализации, чем первый институт. Это, очевидно, объясняется тем, что второй институт имеет дело с более рассредоточенными объектами (строительство), чем первый институт.

Представляет интерес рассмотреть зависимость объема строительства телефонной канализации от суммарной емкости ПАТС и всех телефонных установок прямой связи. Эта зависимость в квадратичной форме описывается формулой (корреляционное отношение 0,98):

$$K_{т_2} = 2{,}64 + 0{,}042N_{общ} + 0{,}00000667N^2_{общ}, \quad (6.80)$$

где $N_{общ}$ — суммарная емкость ПАТС и всех установок прямой телефонной связи на промышленном предприятии и в строительной организации.

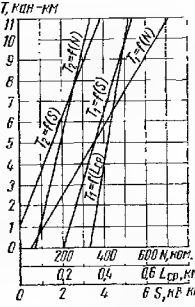



Рис. 6.9. Линейные формы зависимостей объема строительства телефонной канализации от емкости ПАТС, средней длины абонентской линии и обслуживаемой территории по данным двух проектных институтов

В качестве отраслевых зависимостей, как и раньше, рассмотрим данные, относящиеся к строительству и черной металлургии. Сохраняя вышеприведенные обозначения для строительства, имеем:

$$K_т = -3{,}68 + 0{,}67x_1 + 0{,}00168x_1^2; \quad (6.81)$$

$$K_т = -2{,}58 + 0{,}88x_2 + 0{,}0056x_2^2; \quad (6.82)$$

$$K_т = -9{,}93 - 0{,}18x_3 - 0{,}0000015x_3^2; \quad (6.83)$$

$$K_т = -20{,}7 + 0{,}97x_4 - 0{,}00069x_4^2; \quad (6.84)$$

$$K_т = -7{,}76 + 4{,}66x_5 - 0{,}0125x_5^2. \quad (6.85)$$

Корреляционные отношения ф-л (6.81) — (6.85) выше 0,996, а средние ошибки аппроксимации соответственно равны 41,3; 58,2; 42,2; 70,1; 111%. Для расчетов следует принимать ожидаемое значение, которое находится по методике, описанной в разд. 6.4.

Для предприятий черной металлургии с очень небольшим коэффициентом корреляции (0,64) имеем следующую зависимость:

а) в линейной форме:

$$N = 534 + 43{,}8K_т; \quad (6.86)$$

б) в квадратичной форме:

$$N = 310 + 74{,}7K_т - 0{,}38K_т^2. \quad (6.87)$$

Несмотря на большой объем статистики (60 точек), имеют место значительные отклонения по отдельным значениям, что указы-

вает на неравномерность объема телефонной канализации по предприятиям черной металлургии. Зависимости требуемого количества канало-километров телефонной канализации от объема выпускаемой продукции $x_1$ и количества трудящихся на предприятиях черной металлургии $x_5$ в квадратичной форме имеют следующий вид:

$$K_т = 57{,}2 - 29x_1 + 6{,}66x_1^2; \qquad (6.88)$$

$$K_т = -38{,}8 + 10{,}3x_5 - 0{,}074x_5^2. \qquad (6.89)$$

Корреляционные отношения этих формул соответственно равны 0,98 и 0,74, а средние ошибки аппроксимации — 75 и 53,9%. Следовательно, ф-ла (6.89) для практического применения не пригодна.

Количество условных технических единиц в системе исчисления, принятой на предприятиях черной металлургии, может быть рассчитано по формулам:

$$Q = 7240 + 36{,}3F - 0{,}00546F^2, \text{ ед.};$$

$$Q = 5870 + 76{,}9F' - 0{,}0143(F')^2, \text{ ед.};$$

$$Q = 8420 + 110K_т - 0{,}174K_т^2, \text{ ед.},$$

где $F$, $F'$ и $K_т$ имеют тот же смысл и те же равномерности, что и ранее. Корреляционные отношения этих зависимостей соответственно равны 0,83; 0,82 и 0,61.

Использование в разд. 6.4 — 6.6 нескольких корреляционных функций для расчета одного показателя позволяет повысить точность получаемого результата.

## 6.7. ЭТАПНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

Большой объем работ, связанных с созданием современных систем производственной связи, значительное количество требующегося дефицитного оборудования и кабельной продукции приводят к тому, что эти системы внедряются несколькими этапами в течение ряда лет. Поэтому возникает задача распределения требуемого количества ресурсов по годам (кварталам или другим периодам) строительства.

Обозначим общее количество средств производственной связи $i$-го вида, которое должно функционировать в самом конце намечаемого строительства, через $n_{ir}$, а количество этих средств перед началом строительства — через $n_{io}$. Допустим, строительство намечается осуществить $r$ этапами (в течение $r$ лет, кварталов, месяцев и т. д.). Обычно величина $r$ задается в директивном порядке. С целью обеспечения ритмичной работы по строительству системы темп роста $\omega_i$ оснащения подразделений предприятия, подотрасли, отрасли средствами связи данного вида должен быть постоянным. Следовательно, имеем геометрическую прогрессию: в первый год

выделяется $n_{i1}$ средств, а в каждый следующий год не более чем на $\omega_i\%$. Обозначим:

$$q_i = 1 + \frac{\omega_i}{100}, \tag{6.90}$$

где $q_i$ — знаменатель прогрессии. Сумма членов этой прогрессии равна

$$n_{ir} = n_{i0} + n_{i1}\frac{q^r - 1}{q - 1}. \tag{6.91}$$

Отсюда

$$\frac{n_{ir} - n_{i0}}{n_{i1}} = \frac{\left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right)^r - 1}{\frac{\omega_i}{100}}. \tag{6.91'}$$

Если принять приближение для выражения числа в степени $r$ по бином Ньютона, ограничиваясь второй степенью, т. е.

$$\left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right)^r \approx 1 + r\frac{\omega_i}{100} + \frac{r(r-1)}{2}\left(\frac{\omega_i}{100}\right)^2,$$

то решением ур-ния (6.91′) будет

$$\frac{\omega_i}{100} = \frac{2}{r-1}\left(\frac{n_{ir} - n_{i0}}{n_{i1}} - r\right). \tag{6.92}$$

Можно использовать и приближение более высокого порядка, например:

$$\left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right)^r \approx 1 + r\frac{\omega_i}{100} + \frac{r(r-1)}{2}\left(\frac{\omega_i}{100}\right)^2 + \frac{r(r-1)(r-2)}{6}\left(\frac{\omega_i}{100}\right)^3.$$

Тогда приходим к выражению

$$\frac{n_{ir} - n_{i0}}{n_{i1}} = r + \frac{r(r-1)}{2}\frac{\omega_i}{100} + \frac{r(r-1)(r-2)}{6}\left(\frac{\omega_i}{100}\right)^2.$$

Решением этого квадратного уравнения будет

$$\left(\frac{\omega_i}{100}\right)_{1,2} = -\frac{3}{2(r-2)}\left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{8}{3}\frac{r-2}{r-1}\left(\frac{n_{ir} - n_{i0}}{rn_{i1}} - 1\right)}\right]. \tag{6.93}$$

Если полученное значение меньше заданной величины $\omega_i/100$, то решение возможно; если больше, то решения нет. В большинстве случаев вполне достаточно первого из рассмотренных приближений, допускающего использование ф-лы (6.92).

# ГЛАВА СЕДЬМАЯ

## *Выбор типов оборудования и кабелей*

### 7.1. ВЫБОР ТИПА ОБОРУДОВАНИЯ ПАТС

В качестве производственных автоматических телефонных станций на промышленных предприятиях и в строительстве используются АТС декадно-шаговой и координатной систем. В ближайшем будущем ожидается применение квазиэлектронных производственных станций.

Для каждого типа станции функции капитальных и эксплуатационных затрат целиком определяются емкостью ПАТС, поэтому на промышленном предприятии должна быть установлена станция, которая при заданной емкости обеспечивает минимум приведенных затрат.

Годовые эксплуатационные затраты на обслуживание АТС $i$-го типа емкостью $N$ номеров можно выразить в виде

$$Э = a_0 + a_1 N + a_2 N^2, \tag{7.1}$$

а капитальные затраты на строительство этой станции

$$C = (b_0 + b_1 N + b_2 N^2)\theta, \tag{7.2}$$

где $\theta$ — коэффициент, учитывающий строительные и монтажные работы, приобретения и другие начисления на стоимость оборудования.

Приведенные затраты в этом случае будут равны

$$\begin{aligned} П &= Э + E_н C = a_0 + a_1 N + a_2 N^2 + \theta E_н (b_0 + b_1 N + b_2 N^2) = \\ &= (a_0 + b_0 \theta E_н) + (a_1 + b_1 \theta E_н) N + (a_2 + b_2 \theta E_н) N^2. \end{aligned} \tag{7.3}$$

Характер этой зависимости показан на рис. 7.1.

На основании данных, приведенных в гл. 4, можно установить величины коэффициентов $b_0$, $b_1$ и $b_2$ для различных типов станций (см. табл. 5.5). Получить значения коэффициентов $a_0$, $a_1$ и $a_2$ по данным гл. 5 нельзя, так как там устанавливались зависимости общей величины затрат по обслуживанию всей системы производственной связи от емкости различных типов станций. Однако эти зависимости позволяют установить соотношения между отдельными

статьями эксплуатационных расходов. В среднем, по приведенным в гл. 5 данным затраты на заработную плату составляют 34,4% от общей величины эксплуатационных расходов; затраты на материалы и запасные части — 19,6%; амортизационные отчисления — 30,2%; затраты на электроэнергию — 1,2%; прочие затраты — 14,6%. Принимая это распределение за основу в дальнейших расчетах и зная функцию величины эксплуатационных расходов только по одной статье от емкости ПАТС, можно получить приближение к общей величине расходов по формуле

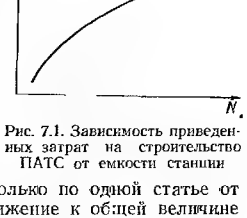


Рис. 7.1. Зависимость приведенных затрат на строительство ПАТС от емкости станции

$$\Theta = \frac{1}{\gamma_i} s_i(N), \tag{7.4}$$

где $\gamma_i$ — средняя доля $i$-й статьи расходов в общей величине эксплуатационных расходов; $s_i(N)$ — функция $i$-й статьи расходов в зависимости от емкости ПАТС. Величина $\gamma_i$ представляет собой средний процент $i$-й статьи, деленный на 100.

Из всех статей эксплуатационных расходов наиболее просто устанавливаются зависимости амортизационных отчислений и зарплаты от емкости станций. Амортизационные отчисления для автоматических телефонных станций всех типов установлены в размере 7,8% от стоимости оборудования. Следовательно, в этом случае

$$\Theta = 0{,}258\,(b_0 + b_1 N + b_2 N^2) \tag{7.5}$$

и искомые коэффициенты будут равны:

$$a = 0{,}258 b_0; \tag{7.6}$$

$$a_1 = 0{,}258 b_1; \tag{7.7}$$

$$a_2 = 0{,}258 b_2. \tag{7.8}$$

Возвращаясь к ф-ле (7.7) и принимая $E_н = 0{,}15$, получим

$$П = (b_0 + b_1 N + b_2 N^2)\,(0{,}258 + 0{,}150). \tag{7.9}$$

Из ф-лы (7.9) видно, что экстремум приведенных затрат для автоматических телефонных станций целиком определяется экстремумом функции капитальных затрат.

При выборе одной из двух типов станций одной емкости имеем:

$$\left.\begin{aligned} П' &= (b'_0 + b'_1 N + b'_2 N^2)\,(0{,}258 + 0{,}150') \\ П'' &= (b''_0 + b''_1 N + b''_2 N^2)\,(0{,}258 + 0{,}150'') \end{aligned}\right\}, \tag{7.10}$$

где один штрих относится к первому типу станции, а два штриха — ко второму. Составим разность

$$\Delta П = П' - П'' = 0{,}258\,[(b'_0 - b''_0) + (b'_1 - b''_1) N + (b'_2 - b''_2) N^2] +$$
$$+ 0{,}15\,[(b'_0 \theta' - b''_0 \theta'') + (b'_1 \theta' - b''_1 \theta'') N + (b'_2 \theta'_2 - b''_2 \theta'') N^2]. \tag{7.11}$$

Если величина $\Delta\Pi > 0$, то целесообразнее использовать второй тип станции, если $\Delta\Pi < 0$, то — первый тип станции, если $\Delta\Pi = 0$, то оба варианта являются эквивалентными. Коэффициенты $b_0$, $b_1$ и $b_2$ подставляются в ф-лу (7.11) из табл. 5.5 с соответствующими знаками. Естественно, что $\Delta\Pi$ должна быть больше погрешности, которую дают применяемые корреляционные формулы.

Допустим, требуется выбрать тип оборудования для станции емкостью 600 номеров. В этом случае имеются два варианта:

1) станция должна быть построена на базе оборудования УАТС-49;

2) станция должна быть построена на базе оборудования учрежденческой АТС К-100/2000.

Из табл. 5.5 выпишем коэффициенты для обоих типов станций:

1. УАТС-49 — $b'_0 = 0{,}49$; $b'_1 = 1{,}37$; $b'_2 = -0{,}01$.

2. АТС К-100/2000 учр. $b''_0 = 2{,}29$; $b''_1 = 7{,}65$; $b''_2 = -0{,}12$.

Подставляя эти коэффициенты в ф-лу (7.11) и принимая $0' = 1{,}18$ и $0'' = 1{,}24$, имеем при $N = 6$:

$$\Delta\Pi = 0{,}258\,(-35{,}3) + 0{,}15\,(-44{,}1) < 0.$$

Следовательно, применение УАТС-49 является в данном случае предпочтительным. Зависимости приведенных затрат для УАТС-49 и АТС К-100/2000 от емкости изображены на рис. 7.2.

Когда рассматриваются не два, а большее количество вариантов, то по ф-ле (7.10) подсчитываются приведенные затраты и для каждого из них выбирается тот, у которого величина $П$ оказывается наименьшей. Поскольку минимум приведенных затрат определяется минимумом капитальных затрат, то преимущество имеют декадно-шаговые станции перед координатными, так как они более дешевые. Положение дел несколько меняется, когда функция эксплуатационных расходов формируется исходя из зависимости затрат на заработную плату обслуживающего персонала от емкости станции. Можно считать, что величина затрат на заработную плату (со всеми начислениями) прямо пропорциональна численности обслуживающего персонала, т. е.

$$э_2 = \varphi R, \text{ тыс. руб.}, \qquad (7.12)$$

где $\varphi$ — средняя годовая заработная плата одного работника, тыс. руб.; $R$ — среднегодовая численность персонала, обслуживающего телефонную станцию.

Численность обслуживающего персонала существенно зависит от применяемой системы оборудования станции. В табл. 7.1 приводятся данные о численности обслуживающего персонала для АТС декадно-шаговой и координатной систем.

Применение программ парной корреляции позволяет получить следующие зависимости (при $N \leqslant 2000$):

а) для декадно-шаговых АТС

$$R_{дш} = 2{,}02 + 0{,}775N - 0{,}008N^2, \text{ чел.}, \qquad (7.13)$$

б) для координатных АТС

$$R_к - 1{,}93 + 0{,}196N + 0{,}001N^2, \text{ чел.} \qquad (7.14)$$

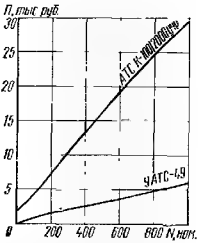



Рис. 7.2 Приведенные затраты на УАТС-49 и учрежденческую модификацию АТС К-100/2000 при линейной зависимости эксплуатационных расходов от емкости станции

Таблица 7.1

ЧИСЛЕННОСТЬ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА, ЧЕЛ. НА АТС ДЕКАДНО ШАГОВОЙ И КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕМКОСТИ СТАНЦИЙ

| Емкость станции | Декадно-шаговая АТС | Координатная АТС |
|---|---|---|
| До 199 | 1 | — |
| 200—499 | 4 | 2 |
| 500 -999 | 8 | 4 |
| 1000—1499 | 9 | 4 |
| 1500 1999 | 13 | 6 |
| 2000 -2999 | 15 | 7 |
| 3000 3999 | 18 | 10 |
| 4000 4999 | 21 | 10 |
| 5000—5999 | 22 | 11 |
| 6000 6999 | 23 | 11 |
| 7000 7999 | 28 | 14 |
| 8000 —8999 | 31 | 15 |

Корреляционные отношения зависимостей (7.13) и (7.14) соответственно равны 0,95 и 0,91. Величина $N$ выражена в сотнях номеров. Графически зависимости (7.13) и (7.14) представлены на *рис. 7.3*.

Учитывая (7.12), величины затрат на заработную плату равны:

а) для декадно-шаговых АТС

$$э_{2дш} = \varphi(2{,}02 + 0{,}775N - 0{,}008N^2), \text{ тыс. руб;} \qquad (7.15)$$

б) для координатных АТС

$$э_{2к} = \varphi(1{,}93 + 0{,}196N + 0{,}001N^2), \text{ тыс. руб.} \qquad (7.16)$$

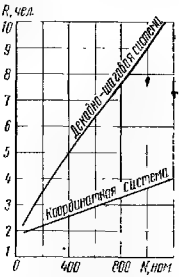



Рис. 7.3. Зависимость численности обслуживающего персонала от емкости

Величины эксплуатационных расходов на обслуживание АТС составят:

а) для декадно-шаговых АТС

$$э_{дш} = \frac{\varphi}{0{,}344}(2{,}02 + 0{,}775N - 0{,}008N^2), \text{ тыс. руб.;} \qquad (7.17)$$

б) для координатных АТС

$$э_{к} = \frac{\varphi}{0{,}344}(1{,}93 + 0{,}196N + 0{,}001N^2), \text{ тыс. руб.} \qquad (7.18)$$

Из ф-л (7.17) и (7.18) следует, что коэффициенты $a_0$, $a_1$ и $a_2$ имеют величины, приведенные в табл. 7.2. С учетом данных табл. 5.5 и 7.2 ф-ла (7.3) при $E_н = 0{,}15$ примет вид:

$$П = (a_0 + 0{,}15b_0\theta) + (a_1 + 0{,}15b_1\theta)N + (a_2 + 0{,}15b_2\theta)N^2. \qquad (7.19)$$

Таблица 7.2

ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ $a_0$, $a_1$ и $a_2$ ДЛЯ АТС ДЕКАДНО-ШАГОВОЙ И КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМ

| Система АТС | Коэффициенты | | |
|---|---|---|---|
| | $a_0$, тыс. руб. | $a_1$, тыс. руб./100 ном | $a_2$, тыс. руб²./1000 ном² |
| Декадно-шаговая | 5,88 φ | 2,25 φ | — 0,0232 φ |
| Координатная | 5,60 φ | 0,57 φ | 0,0029 φ |

В ф-ле (7.19) через θ обозначен коэффициент, учитывающий величину затрат на выполнение монтажных работ, приобретения и т. д. При рассмотрении двух вариантов разность приведенных затрат равна

$$\Delta П = П' - П'' = (a_0' - a_0'') + 0{,}15(b_0'\theta' - b_0''\theta'') + [(a_1 - a_1'') + 0{,}15(b_1'\theta' - b_1''\theta'')]N + [(a_2' - a_2'') + 0{,}15(b_2'\theta' - b_2''\theta'')]N^2, \qquad (7.20)$$

где один штрих относится к коэффициентам, характеризующим один вариант, а два штриха — другой вариант.

Формула (7.20) позволяет выбрать тип оборудования ПАТС при заданной емкости станции при минимуме приведенных затрат.

Установить зависимость между величиной эксплуатационных затрат на обслуживание производственных автоматических телефонных станций, опираясь на результаты, полученные в гл. 5, можно и другим путем. В гл 5 были найдены зависимости величины эксплуатационных расходов от затрат на заработную плату, амортизационные отчисления, затрат на материалы и запасные части, прочих затрат (см. табл. 5.25). Непосредственное использование этих формул несколько затруднено, так как они выведены для больших (верных для всей системы производственной связи) значений аргументов. Так, например, формула для выражения $Э = f(э_з)$ достаточно точна при величинах амортизационных отчислений, нахо-

дящихся в интервале от 50 до 150 тыс. руб. Амортизационных отчислений в 50 тыс. руб. не имеют даже очень большие (6000—8000 номеров) производственные автоматические телефонные станции. Однако имеется возможность получить аналогичные зависимости, которые дадут приемлемые результаты при малых значениях аргументов.

То же самое можно сказать и о имеющихся формулах, которые устанавливают зависимости между численностью обслуживающего персонала и отдельными статьями эксплуатационных расходов. Эти формулы достаточно точны при $R>100$ чел., а при $1\leqslant R\leqslant 15$ должны применяться иные соотношения. Так, например, зависимость между численностью обслуживающего персонала (при $R\leqslant 15$) и затратами на заработную плату в квадратичной форме может быть выражена как

$$э_1 = 0{,}658 + 0{,}885R + 0{,}012R^2, \text{ тыс. руб.;} \qquad (7.21)$$

$$э_2 = 0{,}852 + 1{,}15R + 0{,}015R^2, \text{ тыс. руб.,} \qquad (7.22)$$

где $э_1$, $э_2$, $R$ — сохраняют те же значения, что и ранее.

Корреляционные отношения указанных формул составляют 0,998. На рис. 7.4 приведена зависимость величины $э_2$ от численности обслуживающего персонала. Используем ф-лы (7.21) и (7.22) для расчета ожидаемых величин затрат на заработную плату персонала, обслуживающего АТС декадно-шаговой и координатной систем при емкостях станций до 2000 номеров. Численность обслуживающего персонала принимается по табл. 7.1. Данные расчета сведены в табл. 7.3.

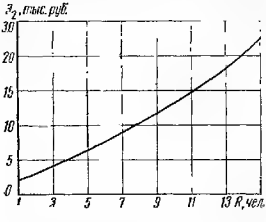



Рис. 7.4. Зависимость затрат на заработную плату от численности обслуживающего персонала

Таблица 7.3

ВЕЛИЧИНЫ ЗАТРАТ НА ЗАРАБОТНУЮ ПЛАТУ ПЕРСОНАЛА, ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО АТС ДЕКАДНО-ШАГОВОЙ И КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМ ЕМКОСТЬЮ ДО 2000 НОМЕРОВ

| Численность обслуживающего персонала | Годовые затраты на заработную плату, тыс. руб | |
|---|---|---|
| | без начислений | с начислениями |
| 1 | 1,56 | 2,02 |
| 2 | 2,48 | 3,21 |
| 4 | 4,39 | 5,69 |
| 6 | 6,40 | 8,29 |
| 8 | 8,51 | 11,01 |
| 9 | 9,60 | 12,42 |
| 13 | 14.19 | 18,34 |

Для определения зависимости между годовыми эксплуатационными затратами на обслуживание ПАТС и величиной затрат на заработную плату необходимо проанализировать соответствующий

статистический материал. Рассмотрим приведенный выше пример о выборе типа оборудования для АТС емкостью 600 номеров. Используем ф-лу (7.20), подставляя в нее значения $b$ и $a$ из табл. 5.5 и 7.2:

$$\Delta И - 9{,}12\varphi - 6{,}62.$$

Принимая среднегодовую зарплату с начислениями одного рабочника по данным табл. 7.1 и 7.3, равной $\varphi = 11{,}01/8 = 1{,}37$ тыс. руб./год, получим: $\Delta П = 9{,}12 \cdot 1{,}37 - 6{,}62 = 12{,}62 - 6{,}62 = 6{,}0 > 0$. Мы по-прежнему принимаем $\theta' = 1{,}18$ и $\theta'' = 1{,}24$. Следовательно, целесообразнее применить АТС координатной системы, обеспечивающую меньшую величину приведенных затрат. Таким образом, учет нелинейности функции эксплуатационных затрат в зависимости от емкости и типа станции приводит к получению диаметрально противоположного результата.

## 7.2. ВЫБОР ТИПА КОММУТАТОРА ПРЯМОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ

Тип коммутатора прямой телефонной связи выбирается, исходя из заданной его емкости и условий его эксплуатации. Так, например, в тех случаях, когда в месте установки абонентских устройств имеются производственные шумы или когда требуется широкая гласность переговоров, предпочтение отдается коммутаторам, обеспечивающим громкоговорящую передачу. Одновременно у абонентов появляется возможность вести переговоры, не занимая своих рук. В других ситуациях лучше применять установки ,в которых передача и прием производятся с помощью микротелефонной трубки. Однако, когда имеется несколько вариантов, равнозначных с точки зрения технических возможностей, тип коммутатора прямой телефонной связи выбирается по экономическим критериям, в частности, по минимуму приведенных затрат.

Выбор типа коммутатора состоит из определения его емкости, проводности абонентских линий, массы комплекта и некоторых других характеристик. При этом основным параметром, определяющим тип коммутатора, является его емкость. Стоимость станционного оборудования диспетчерской и директорской связи с учетом монтажных работ в зависимости от емкости определяется формулами:

$$C - [0{,}0833 + 0{,}0586N - 0{,}000586N^2]\,\theta, \text{ тыс. руб.};$$

$$C - [0{,}492 + 0{,}0214N]\,\theta, \text{ тыс. руб.},$$

где $N$ выражено в номерах; $\theta$ — коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на стоимость оборудования.

Первая формула может применяться для установок емкостью до 50 номеров, а вторая — при емкости свыше 50 номеров.

Величина затрат на заработную плату определяется численностью обслуживающего персонала. Сохраняя условные обозначения, принятые выше, имеем соотношение, выраженное ф-лой (7.12). Затраты на заработную плату могут быть подсчитаны в зависимости от численности персонала и по ф-ле (7.22). Численность персонала, обслуживающего установки прямой телефонной связи, зависит от времени профилактики и ремонта, которое нормируется следующим образом:

а) для установок без усилителя — 10 мин. в месяц на 1 монтированный номер;

б) для установок с усилителем — 15 мин. в месяц на 1 монтированный номер.

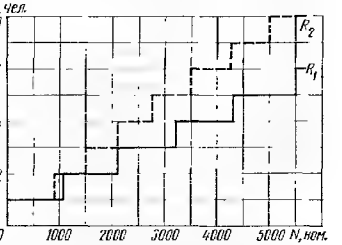



Рис. 7.5. Зависимость численности обслуживающего персонала от емкости установок прямой телефонной связи.

$R_1$ для установок без усилителей; $R_2$ для установок с усилителями

Принимая среднемесячную норму рабочего времени, равной 174 ч, получим:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= \left[\frac{10}{60}\,\frac{N}{174}\right] = \left[\frac{N}{1044}\right], \text{ чел.} \\ R_2 &= \left[\frac{15}{60}\,\frac{N}{174}\right] = \left[\frac{N}{696}\right], \text{ чел.} \end{aligned}\right\}. \tag{7.23}$$

Скобки означают, что берется целое число. Индекс 1 относится к установкам без усилителей, а 2 — к установкам с усилителем. Зависимости (7.23) изображены на рис. 7.5. Вместо приведенных нормативов для получения зависимости численности обслуживающего персонала могут быть использованы данные о надежности установок прямой телефонной связи, а также методологические посылки, которые были рассмотрены выше.

Величины эксплуатационных расходов соответственно будут равны:

$$\left.\begin{aligned} э_{x_1} &= \frac{\varphi R_1}{0{,}344} = \frac{\varphi N}{359} = 0{,}00279\varphi N, \text{ тыс. руб.} \\ э_{x_2} &= \frac{\varphi R_2}{0{,}344} = \frac{\varphi N}{239} = 0{,}00418\varphi N, \text{ тыс. руб.} \end{aligned}\right\}, \tag{7.24}$$

а величины приведенных затрат при $E_н = 0{,}15$:

$$П_1 = 0{,}0125\Theta + (0{,}00279\varphi + 0{,}00879\Theta)\,N - 0{,}0000879\,\Theta N^2, \text{ тыс. руб.;} \quad (7.25)$$

$$П_2 = 0{,}0125\Theta + (0{,}004184\varphi + 0{,}00879\Theta)\,N - 0{,}0000879\,\Theta N^2, \text{ тыс. руб.} \quad (7.26)$$

Анализ ф-л (7.25) и (7.26) показывает, что они имеют минимум при значениях емкости коммутаторов, равных:

$$N_1 = 50 + 15{,}8\,\frac{\varphi}{\Theta}, \text{ номеров;} \quad (7.27)$$

$$N_2 = 50 + 23{,}7\,\frac{\varphi}{\Theta}, \text{ номеров.} \quad (7.28)$$

Таким образом, оптимальная емкость коммутатора заведомо больше 50 номеров. Вследствие этого рассмотрим величины приведенных затрат при линейной зависимости стоимости станционного оборудования от емкости установки при $E_н = 0{,}15$:

$$П'_1 = 0{,}0738\Theta + (0{,}00279\varphi + 0{,}00320)\,N, \text{ тыс. руб.;} \quad (7.25')$$

$$П'_2 = 0{,}0738\Theta + (0{,}00418\varphi + 0{,}00320)\,N, \text{ тыс. руб.} \quad (7.26')$$

Формулы (7.25′) и (7.26′) экстремума не имеют. Выбор типа коммутатора прямой телефонной связи в том случае, когда сравниваются два варианта размещения установок без усилителей емкостью до 50 номеров, производится по формуле

$$\Delta П_1 = 0{,}0125\,(\theta_1 - \theta_2) + 0{,}00279\varphi\,(N_1 - N_2) + \\ + 0{,}00879\,(\theta_1 N_1 - \theta_2 N_2) - 0{,}0000879\,(\theta_2 N_2^2 - \theta_1 N_1^2), \text{ тыс. руб.} \quad (7.29)$$

Аналогично (7.29) для установок с усилителями имеем

$$\Delta П_2 = 0{,}0125\,(\theta_1 - \theta_2) + 0{,}00418\varphi\,(N_1 - N_2) + \\ + 0{,}00879\,(\theta_1 N_1 - \theta_2 N_2) - 0{,}0000879\,(\theta_2 N_2^2 - \theta_1 N_1^2), \text{ тыс. руб.} \quad (7.30)$$

При емкостях установок свыше 50 номеров соответственно имеем:

$$\Delta П'_1 = 0{,}0738\,(\theta_1 - \theta_2) + 0{,}00279\varphi\,(N_1 - N_2) + \\ + 0{,}0032\,(\theta_1 N_1 - \theta_2 N_2), \text{ тыс. руб.;} \quad (7.31)$$

$$\Delta П'_2 = 0{,}0738\,(\theta_1 - \theta_2) + 0{,}00418\varphi\,(N_1 - N_2) + \\ + 0{,}0032\,(\theta_1 N_1 - \theta_2 N_2), \text{ тыс. руб.} \quad (7.32)$$

В ф-лах (7.29)—(7.32), если $\Delta П_1 > 0$, то экономически целесообразно использовать установку, имеющую индекс 2; если $\Delta П < 0$, то надо применять установку с индексом 1. При $\Delta П = 0$ оба варианта являются равноценными.

Функцию эксплуатационных затрат можно получить, исходя из величины амортизационных отчислений. Все диспетчерские и директорские коммутаторы имеют норму амортизационных отчислений 11,6%. Однако в этом случае исчезает разница между установками, обеспечивающими прием на громкоговоритель и микротелефонную трубку. Методика оценки эксплуатационных затрат по величине амортизационных отчислений аналогична описанной в предыдущем разделе.

## 7.3. ВЫБОР ТИПА ПРИМЕНЯЕМОГО КАБЕЛЯ

Тип кабеля может быть выбран, исходя из заданных величин емкости, диаметра токоведущих жил, а также совокупности факторов, определяющих условия прокладки кабеля (в земле, в телефонной канализации, коллекторе, по стене, стволам шахт, на опорах и т. д.).

Емкость кабеля зависит от требуемого количества связей в данном направлении, а также от способа их организации. При тональном телефонировании количество связей должно быть равно количеству физических линий (двух, трех или четырехпроводных). Когда применяется высокочастотное уплотнение, количество связей приравнивается числу каналов. В последнем случае емкость кабеля $v$ должна составлять

$$v \geqslant V/x, \tag{7.33}$$

где $V$ — требуемое количество связей в данном направлении с учетом эксплуатационного запаса (общее число каналов); $x$ — количество каналов, которое можно образовать по одной паре кабеля.

Однако в обоих случаях не удастся получить полного соответствия между требуемым количеством связей и емкостью прокладываемого кабеля. Это объясняется тем, что на практике используются кабели, имеющие не непрерывную (любую) емкость, а только дискретные (фиксированные) значения емкости — 5×2, 10×2 и т. д., 1×4, 4×4, 7×4 и т. п. В связи с этим возникает необходимость решения задач, связанных с определением оптимального числа кабелей, которые должны быть проложены на рассматриваемом направлении. Эти задачи сводятся к установлению емкости прокладываемых кабелей.

На участке $ij$ должно быть организовано $V_{ij}$ низкочастотных связей. Необходимо выбрать такие емкости кабелей, чтобы был обеспечен минимум приведенных затрат. По существующим нормативам эксплуатационные расходы не зависят от числа проложенных кабелей, а определяются только суммарной величиной километро-пар, которая в данной постановке задачи является константой. Поэтому правомерно заменить требование о минимуме приведенных затрат требованием о минимуме капитальных затрат.

Представим величину капитальных затрат на 1 км трассы в зависимости от емкости кабеля в виде линейной функции:

$$C_{ij} = a_0 + a_1 v_{ij}, \tag{7.34}$$

где $v_{ij}$ — емкость кабеля на участке $ij$ в парах; $a_0$, $a_1$ — коэффициенты, зависящие от конструкции кабеля и способа организации межстанционной связи (тональное телефонирование или высокочастотное уплотнение). Как будет показано в гл. 8, представление капитальных затрат в виде функции (7.34) является правомерным.

Теперь допустим, что вместо одного кабеля емкостью $v_{ij}$ на участке $ij$ прокладываются два кабеля с емкостями $v_1$ и $v_2$, причем

$$v_{ij} = v_1 + v_2. \tag{7.35}$$

В этом случае капитальные затраты на 1 км трассы будут равны

$$C_{ij1,2} = 2a_0 + a_1(v_1 + v_2). \tag{7.36}$$

Сравнивая (7.36) с (7.34), можно установить, что величина $C_{ij\,1,2}$ всегда больше величины $C_{ij}$. Следовательно, при выполнении условия (7.35) прокладка одного кабеля всегда выгоднее, чем прокладка двух, трех и т. п. кабелей. Этот вывод можно получить и при выражении величины капитальных затрат на 1 км трассы в зависимости от емкости кабеля в виде полинома второй степени, т. е.

$$C_{ij} = a_0 + a_1 v_{ij} + a_2 v_{ij}^2. \tag{7.37}$$

Тогда стоимость прокладки 1 км двух кабелей емкостью $v_1$ и $v_2$

$$C_{ij1,2} = a_2(v_1^2 + v_2^2) + a_1(v_1 + v_2) + 2a_0. \tag{7.38}$$

Учитывая (7.35), выразим $v_1$ через $v_2$ и $v_{ij}$:

$$v_1 = v_{ij} - v_2$$

и подставим в (7.38):

$$C_{ij1,2} = a_2(v_{ij}^2 - 2v_{ij}v_2 + 2v_2^2) + a_1 v_{ij} + 2a_0. \tag{7.38'}$$

Для того чтобы было выгоднее проложить два кабеля вместо одного, необходимо удовлетворение неравенства: $C_{ij} > C_{ij\,1,2}$ или $a_2 v_{ij}^2 + a_1 v_{ij} + a_0 > a_2(v_{ij}^2 - 2v_{ij}v_2 + 2v_2^2) + a_1 v_{ij} + 2a_0$. После элементарных упрощений получим

$$v_2^2 - v_{ij}v_2 + \frac{a_0}{2a_2} < 0. \tag{7.39}$$

Обращая неравенство (7.39) в равенство и решая квадратное уравнение относительно $v_2$, имеем

$$v_2' = \frac{v_{ij}}{2} \pm \sqrt{\frac{v_{ij}^2}{4} - \frac{a_0}{2a_2}}, \tag{7.40}$$

где $v'_2$ — значение величины емкости кабеля $v_2$, при котором неравенство (7.39) обращается в равенство.

Из (7.39) и (7.40) следует

$$v_2 < \frac{v_{ij}}{2} \mp \sqrt{\frac{v_{ij}^2}{4} - \frac{a_0}{2a_2}}. \qquad (7.41)$$

Учитывая (7.35), имеем

$$v_1 = v_{ij} - v_2 > \frac{v_{ij}}{2} \pm \sqrt{\frac{v_{ij}^2}{4} - \frac{a_0}{2a_2}}. \qquad (7.41')$$

Из рассмотрения ф-л (7.41) и (7.41′) видно, что в правой части обоих неравенств при $a_2<0$ второй член всегда больше первого. Учитывая симметричность этих формул, можно сделать вывод о том, что в любом случае одно из двух значений емкости (либо $v_1$, либо $v_2$) будет отрицательным, в то время как другое значение будет больше $v_{ij}$. Поэтому в тех случаях, когда $a_2<0$, дробление требуемого количества связей на кратное количество емкостей, а также на две (а тем более три и т. д.) суммы емкостей является нецелесообразным. Следовательно, при обеспечении условия (7.35) прокладка одного кабеля выгоднее прокладки двух и большего числа кабелей.

Таким образом, выяснено, что практически всегда один кабель проложить экономически выгоднее, чем два кабеля той же суммарной емкости. Однако, поскольку кабели выпускаются только с дискретными номинальными значениями емкостей, то может оказаться, что два кабеля имеют меньшую суммарную емкость, чем один. Например, если потребность в связях на участке составляет 250 пар, то при использовании одного кабеля необходимо проложить трехсотпарную емкость. В то же время, проложив два кабеля емкостью 100 и 150 пар, можно получить требуемое количество связей. Рассмотрим такую задачу. имеется потребность в связях $V_{ij}$, для реализации которой можно проложить либо один кабель емкостью $v_{ij}$, либо два кабеля емкостью $v_1$ и $v_2$, причем $v_1+v_2<v_{ij}$. Обозначим

$$\Delta v = v_{ij} - v_1 - v_2. \qquad (7.42)$$

Теперь необходимо выяснить, при каком значении $\Delta v$ прокладка двух кабелей предпочтительней. Стоимость 1 км трассы при прокладке одного кабеля согласно (7.34) равна $C_{ij}=a_0+a_1v_{ij}$, а при прокладке двух кабелей $C_{ij\,1,2}=2a_0+a_1(v_1+v_2)$. Рассмотрим условие равенства этих затрат, т. е. $C_{ij}=C_{ij\,1,2}$. После очевидных преобразований получим

$$\Delta v = a_0/a_1. \qquad (7.43)$$

Следовательно, если фактическая разность $v_{ij}-v_1-v_2$ меньше (7.43), то целесообразно проложить один кабель, если больше, то — два.

Если стоимость участка выражается в виде (7.37), то можно придти к уравнению:

$$\Delta v^2 + \left[2(v_{ij} + v_2) - \frac{a_1}{a_2}\right]\Delta v + 2(-v_{ij}v_2 + v_2^2) + \frac{a_0}{a_2} = 0. \quad (7.44)$$

Решениями этого уравнения являются:

$$\Delta v = \left[\frac{a_1}{2a_2} - (v_{ij} + v_2)\right] \pm$$

$$\pm \sqrt{\left[\frac{a_1}{2a_2} - (v_{ij} + v_2)\right]^2 - 2\left(v_2^2 - v_{ij}v_2\right) - \frac{a_0}{a_2}}. \quad (7.45)$$

Второй член (7.45) больше первого члена, так как $a_2<0$ и $v_{ij}v_2> >v_2^2$. Поэтому перед радикалом следует брать знак плюс. В том случае, когда можно подобрать такие значения $v_1$ и $v_2$ (причем можно показать, что наиболее рационально соотношение $v_1\approx \approx v_2$), которые обеспечили бы выполнение условия $v_{ij}-(v_1+ +v_2)>\Delta v$, где $\Delta v$ подсчитывается по ф-ле (7.45), то следует проложить кабели с этими емкостями.

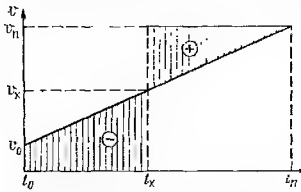



Рис. 7.6. К определению срока прокладки кабеля при линейной функции роста потребностей в связях

Выше мы считали, что требуемое количество связей в рассматриваемом направлении $V_{ij}$ является величиной постоянной. Однако, на самом деле, она существенно изменяется во времени. Допустим, планируется развитие данного направления связи на $t_n$ лет и известно, что потребность в линиях связи со временем увеличивается по линейному закону, как это показано на фиг. 7.6. В момент времени $t_0$ потребность составляет $V_0$ пар (каналов), а в момент $t_n$ — $V_n$, т. е.

$$V = \omega t + V_0, \quad (7.46)$$

где $\omega$ — темп роста потребности.

Будем считать, что в некоторый момент времени $t_x$ прокладывается кабель емкостью $V_n$. Тогда, как следует из рис. 7.6, можно выделить две области:

а) $t_0$—$t_x$ — область дефицита; потребность в линиях связи растет, но не удовлетворяется совершенно;

б) $t_x$—$t_n$ — область избытка; запас в кабеле обеспечивает удовлетворение растущих потребностей без каких-либо дополнительных затрат.

Обозначим площадь области дефицита через $S_д$, площадь области избытка через $S_и$. Тогда

$$S_д = V_0(t_x - t_0) + \frac{1}{2}(V_x - V_0)(t_x - t_0). \quad (7.47)$$

Можно принять $t_0=0$. Тогда, учитывая (7.46), получим

$$S_д = V_0 t_x + \frac{1}{2} V_x t_x - \frac{1}{2} V_0 t_x = \frac{1}{2}(V_0 + V_x) = \frac{1}{2} t_x (V_0 + \omega t_x + V_0) = \frac{1}{2} \omega t_x^2 + V_0 t_x. \quad (7.48)$$

Аналогично этому

$$S_н = \frac{1}{2}(t_n - t_x)(V_n - V_x) = \frac{1}{2}(t_n - t_x)(\omega t_n + V_0) - \frac{1}{2}(t_n - t_x)(\omega t_x + V_0). \quad (7.49)$$

Раскрывая скобки и приводя подобные члены, имеем

$$S_н = \frac{1}{2}(t_n - t_x)^2. \quad (7.50)$$

Составим функцию

$$y = \rho S_д + \gamma S_н, \quad (7.51)$$

где $\rho$ — стоимость дефицита одной связи заданной протяженности в единицу времени; $\gamma$ — стоимость простоя одной связи заданной протяженности в единицу времени.

При принятых обозначениях величина $y$ представляет собой сумму убытков от дефицита связи и замораживания средств в недоиспользованной емкости кабеля на 1 км связи. Потребуем минимизации функции (7.51), т. е.

$$\frac{dy}{dt_x} = \omega t_x \rho + V_0 \rho - \omega \gamma t_n + \omega \gamma t_x = 0. \quad (7.52)$$

После несложных преобразований получим

$$t_x = \frac{t_n - \frac{\rho}{\omega\gamma} V_0}{1 + \frac{\rho}{\gamma}} = \frac{t_n - \frac{s}{\omega} V_0}{1 + s}, \quad (7.53)$$

где $s=\rho/\gamma$ — относительное соотношение между дефицитом и избытком. В практических расчетах можно принимать $s=1$, хотя в некоторых случаях по условиям производства справедливо неравенство $\rho \gg \gamma$. Взяв вторую производную, имеем

$$\frac{d^2y}{dt_x^2} = \omega\rho + \omega\gamma > 0. \quad (7.54)$$

Следовательно, ф-ла (7.53) действительно соответствует минимуму убытков и прокладка кабеля в момент $t_x$ является оптимальной.

Пользование ф-лой (7.53) требует большой уверенности в правильности выбора временного отрезка, в течение которого осуще-

ставляется планирование развития связи на данном направлении, а также установления закона роста потребности в связях и соотношения между дефицитом и избытком, которое может быть принято в расчете. Даже небольшие вариации этих параметров приводят к существенному сдвигу момента прокладки кабеля.

Для определения сроков прокладки и емкости кабелей в [80] используется метод динамического программирования. При этом величины капитальных затрат рассматриваются не как непрерывные, а как дискретные числа. Дискретный характер носит также и потребность в связях. Пусть в некоторые моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_n$ в рассматриваемом направлении необходимо иметь число пар кабеля $V_1, V_2, \ldots, V_n$. Будем считать, что величина $V_1$ удовлетворяет потребность в числе линий с момента времени $t_1$ до $t_2$, величина $V_2$ — с момента $t_2$ до $t_3$ и т. д. Величина капитальных затрат на прокладку кабелей общей емкостью $u_i$ в момент времени $t_i$ определяется из выражения

$$C_t = \frac{c_t l}{(1 + E_н)^{t_i - t_1}}, \tag{7.55}$$

где $c_i$ — величина капитальных затрат на 1 км пучка линий, реализуемых кабелями общей емкостью $u_i$; $l$—длина участка, км; $E_н$— коэффициент экономической эффективности. Из-за дискретных значений емкостей кабелей число прокладываемых пар может принимать лишь одно из значений, образующих множество

$$U = \{u_1, u_2, \ldots, u_q\}, \tag{7.56}$$

элементы которого расположены в порядке возрастания. Каждому элементу множества (7.56) соответствует определенная величина капитальных затрат. Следовательно, имеется соответствующее множеству (7.56) другое множество:

$$C = \{c_1, c_2, \ldots, c_q\}. \tag{7.57}$$

Задача оптимального распределения затрат по годам планируемого периода запишется следующим образом:

$$C' = \min_{u_1, u_2, \ldots, u_n} \sum_{i=1}^{n} C_t = \min_{u_1, u_2, \ldots, u_n} \sum_{i=1}^{n} \frac{c_t l}{(1 + E_н)^{t_i - t_1}} \tag{7.58}$$

при условии, что

$$\sum_{i=1}^{j} u_i > V_j, \; j = 1, 2, \ldots, n, \; u_i \in U. \tag{7.59}$$

Весь процесс планирования разделяется на $n$ шагов в соответствии с моментами времени $t_1, t_2, \ldots, t_n$. В терминах динамического программирования число прокладываемых пар кабеля $u_i$ назовем управлением на $i$-м шаге, суммарные капитальные затраты за весь период планирования $C$ — целевой функцией, суммарное

число пар, проложенных на данном направлении за $j$ шагов, $u_j$ — состоянием в конце $j$-го шага: $u_j = \sum_{i=1}^{j} u_i$. Обозначим через $\Delta$ наибольший общий делитель фиксированных значений емкостей кабеля.

В качестве первого состояния в конце $j$-го шага принимается величина, полученная округлением минимально допустимого числа линий $V_j$ до ближайшего большего числа $V'_j$, кратного $\Delta$. Остальные возможные состояния на $j$-м шаге находятся из соотношения

$$V_{j+1} = V_j + \Delta, \quad j = 1, 2 \ldots \tag{7.60}$$

Для решения данной задачи методом динамического программирования процесс оптимизации необходимо начинать с $n$-го шага. Оптимизация $n$-го шага заключается в определении такого управления $u_j^{(n)}$ для каждого из допустимых состояний $V_j^{(n-1)}$, $j = 1, 2, \ldots, m$, на $(n-1)$-м шаге, чтобы

$$V_j^{(n-1)} + u_j^{(n)} > V_1^{(n)}, \quad j = 1, 2, \ldots, m; \tag{7.61}$$

$$C_j^{(n)} = \min_{u_j^{(n)}} \frac{c_j^{(n)} l}{(1 + E_н)^{t_n - t_1}}. \tag{7.62}$$

Последнее состояние на $(n-1)$-м шаге, которое необходимо учитывать при оптимизации $n$-го шага, принимается равным $V_m^{(n-1)} = V_1^{(n)}$. Действительно, при переходе из состояний $V_j^{(n-1)} \geqslant V_m^{(n-1)}$, $j = m, m+1 \ldots$, в конечное состояние в соответствии с условиями (7.61) и (7.62) управление на $n$-м шаге следует выбирать равным нулю. Поэтому все состояния $V_j^{(n-1)} > V_m^{(n-1)}$, $j = m, m+1 \ldots$, при оптимизации $n$-го шага из рассмотрения можно исключить. В результате оптимизации $n$-го шага для каждого из допустимых состояний на $(n-1)$-м шаге $V_j^{(n-1)}$, $j = 1, 2, \ldots, m$, находится управление $u_j^{(n)'}$, $j = 1, 2, \ldots, m$, называемое условным оптимальным управлением, и соответствующие ему капитальные затраты $C^{(n)'}$ на $n$-м шаге. Результаты оптимизации $n$-го шага приведены в табл. 7.4.

Переходим к оптимизации $(n-1)$-го шага. Для этого по аналогии с процессом оптимизации $n$-го шага определяются все возможные допустимые состояния $V_i^{(n-2)}$, $i = 1, 2, \ldots, p$, на $(n-2)$-м шаге. Условное оптимальное управление на $(n-1)$-м шаге выбирается так, чтобы оно совместно с уже выбранным управлением на $n$-м шаге обеспечивало минимальное значение целевой функции. Рассмотрим последовательность отыскания условных оптимальных управлений для каждого из состояний $V_i^{(n-2)}$, $i = 1, 2, \ldots, p$, на $(n-2)$-м шаге. При этом возможны три случая:

Таблица 7.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ $n$ ГО ШАГА

| Состояние на $(n-1)$-м шаге | Управление на $n$-м шаге | Затраты на $n$-м шаге |
|---|---|---|
| $V_1^{(n-1)}$ | $u_1^{(n)'}$ | $C_1^{(n)'}$ |
| $V_2^{(n-1)}$ | $u_2^{(n)'}$ | $C_2^{(n)'}$ |
| . . . | . . . | . . . |
| $V_j^{(n-1)}$ | $u_j^{(n)'}$ | $C_j^{(n)'}$ |
| . . . | . . . | . . . |
| $V_m^{(n-1)}$ | $u_m^{(n)'}$ | $C_m^{(n)'}$ |

1. $V_i^{(n-2)} < V_1^{(n-1)}$. В этом случае определяются управления $u_{ij}^{(n-1)}$, $j=1, 2, \ldots, m$, по которым осуществляется переход из состояния $V_i^{(n-2)}$ в каждое из $m$ состояний на $(n-1)$-м шаге (рис. 7.7). Управление $u_{ij}^{(n-1)}$ выбирается ближайшим к разности $[V_j^{(n-1)} - V_i^{(n-2)}]$ и удовлетворяющим условиям: $V_i^{(n-2)} + u_{ij}^{(n-1)} \geqslant V_j^{(n-1)}$, $j=1, 2, \ldots, m$, $u_{ij}^{(n-1)} \in U$. Каждому из управлений $u_{ij}^{(n-1)}$ соответствуют затраты:

$$C_{ij}^{(n-1)} = \frac{c_{ij}^{(n-1)} l}{(1+E_н)^{t_{n-1}-t_1}}.$$

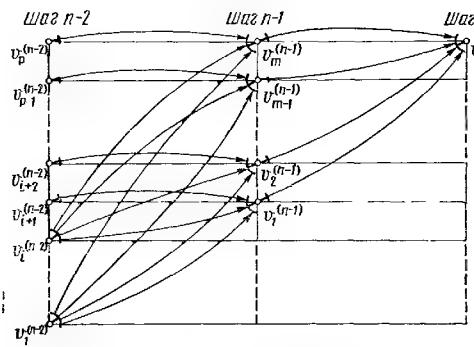



Рис. 7.7. К определению сроков прокладки кабелей методом динамического программирования

Общие затраты для перехода из состояния $V_i^{(n-2)}$ через состояние $V_j^{(n-1)}$ в конечное состояние $V_1^{(n)}$ равны:

$$C_{ij}^{(n,\ n-1)} = C_j^{(n)'} + C_{ij}^{(n-1)}.$$

Из всех $m$ определенных таким образом управлений условным оптимальным является такое $u_i^{(n-1)'}$, при котором

$$C_i^{(n,\ n-1)'} = \min_{u_i^{(n-1)} \ldots u_{im}^{(n-1)}} [C_j^{(n)'} + C_{ij}^{(n\ 1)}],\ j = 1, 2, \ldots, m.$$

Аналогично определяются условные оптимальные управления для каждого из состояний на $(n-2)$-м шаге, удовлетворяющих условию $V_i^{(n-2)} < V_i^{(n-1)}$.

2. $V_i^{(n-2)} = V_i^{(n\ 1)}$. В этом случае условное оптимальное управление на $(n-1)$-м шаге следует принимать равным нулю.

3. $V_i^{(n-2)} > V_i^{(n-1)}$. Можно доказать, что и в данном случае условное оптимальное управление на $(n-1)$-м шаге должно быть также, как и во втором случае, нулевым.

Поскольку для рассматриваемого направления задается лишь единственное начальное состояние, то после оптимизации первого шага, в отличие от всех других шагов, находятся единственное оптимальное управление. Найденное, таким образом, оптимальное управление на первом шаге позволяет однозначно определить оптимальные управления на всех последующих шагах.

Для выбора типа кабеля, как указывалось выше, кроме емкости необходимо знать диаметр жил и условия его прокладки. Последние целиком определяются назначением кабеля, характером трассы, внешними воздействиями и другими факторами, которые, как правило, диктуют однозначное решение, не зависящее от экономических соображений.

Диаметр токоведущих жил рассчитывается по формулам гл. 5. При этом предварительно должен быть выбран способ организации связи (низкочастотное телефонирование или высокочастотное уплотнение), а также установлена норма затухания, отводимая на данный участок. Указанные вопросы связаны не столько с выбором типа кабеля, сколько с решением кардинальных вопросов построения всей системы производственной связи, и рассматриваются в следующей главе.

# ГЛАВА ВОСЬМАЯ

## *Оптимизация схем организации связи*

### 8.1. ВЫБОР СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСТАНЦИОННОЙ СВЯЗИ

Допустим, требуется соединить между собой две телефонные станции таким образом, чтобы количество линий (каналов) между ними было равно $v$, а затухание линейного тракта не превышало бы $A$ дБ. Решить эту задачу можно одним из следующих способов:

1) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,4 мм;

2) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,4 мм и установкой усилителей;

3) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,5 мм;

4) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,5 мм и установкой усилителей;

5) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,7 мм;

6) прокладкой кабеля с диаметром жил 0,7 мм и установкой усилителей;

7) прокладкой кабеля типа МКСГ (МКСБ) с последующим его высокочастотным уплотнением.

Пупинизация и другие способы искусственного повышения индуктивности из рассмотрения исключены ввиду их неперспективности. Первые шесть вариан-

Таблица 8.1

СТОИМОСТЬ КАБЕЛЯ ТИПА ТПП С УЧЕТОМ СТОИМОСТИ ПРОКЛАДКИ В ТЕЛЕФОННОЙ КАНАЛИЗАЦИИ И МОНТАЖА

| Емкость кабеля, пар | Стоимость, руб/км, кабеля, прокладки и монтажа при диаметре жил, мм: | | |
|---|---|---|---|
| | 0,4 | 0,5 | 0,7 |
| | $c_1$ | $c_2$ | $c_3$ |
| 5 | 286 | 306 | 336 |
| 10 | 346 | 361 | 426 |
| 20 | 437 | 467 | 607 |
| 30 | 549 | 589 | 799 |
| 50 | 742 | 802 | 1102 |
| 100 | 1208 | 1308 | 1901 |
| 150 | 1565 | 1739 | 2649 |
| 200 | 1940 | 2153 | 3367 |
| 300 | 2711 | 3015 | 4825 |
| 400 | 3513 | 3887 | 6247 |
| 500 | 4236 | 4676 | 7756 |
| 600 | 4965 | 5495 | 9098 |

тов организации связи можно попарно объединить, если составить функцию

$$C_i = c_i l + bn_i, \tag{8.1}$$

где $C_i$ — стоимость $i$-го варианта организации низкочастотной связи ($i=1, 2, 3$, причем индекс 1 относится к варианту использования кабеля с диаметром жил 0,4 мм; индекс 2 — с диаметром жил 0,5 мм и индекс 3 — с диаметром жил 0,7 мм); $c_i$ — стоимость одного километра кабеля $i$-го вида емкостью $v$ линий; $b$ — стоимость комплекта усилительной аппаратуры на соединительной линии; $n_i$ — количество усилительных пунктов при применении кабеля $i$-го вида.

Величины $c_i$ приведены в табл. 8.1, а величины $b$ — в табл. 8.2. Данные взяты из действующих прейскурантов 15-09, 16-01, 16-02, а также ценников №№ 8 и 10.

Количество усилителей $n_i$ может быть определено из соотношения

$$\alpha_i l - n_i S \leqslant A, \tag{8.2}$$

где $\alpha_i$ — километрическое затухание кабеля $i$-го вида, дБ/км; $A$ — норма затухания, дБ; задается техническими условиями на сеть в целом или определяется расчетом при распределении нормы по отдельным участкам; $S$ — величина усиления усилителя.

Из (8.2) непосредственно вытекает

$$n_i \geqslant \left[\frac{\alpha_i l - A}{S}\right], \tag{8.3}$$

где скобки означают, что берется ближайшее целое число.

Таким образом, если $\alpha_i l - A > 0$, то количество усилителей определяется по ф-ле (8.3); если $\alpha_i l - A < 0$, то $n_i = 0$. С помощью (8.3) и указанного ограничения удается рассматривать варианты, связанные с прокладкой низкочастотных кабелей без установки усилителей, как частные случаи вариантов с установкой усилителей, а именно при $n_i = 0$.

Учитывая, что на одном участке не может быть беспредельного количества промежуточных усилителей, введем ограничение

$$n_i \leqslant n_{\text{макс}}. \tag{8.4}$$

Обычно $n_{\text{макс}} \leqslant 2$.

Если величина $n_i$ оказывается больше, чем $n_{\text{макс}}$, то необходимо перейти к рассмотрению вариантов, связанных с применением $(i+1)$-го вида кабелей, а если $i=3$, то — к высокочастотному уплотнению. Варианты указаны в порядке возрастания обеспечиваемой ими дальности связи, а следовательно, и их сложности. Стоимость кабеля, предназначенного для высокочастотного уплотнения, может быть определена по формуле:

$$C_4 = c_4 l + c_{\text{пу}} n' + 2C_{\text{ск}}, \text{ руб.}, \tag{8.5}$$

где $c_4$ — стоимость 1 км кабеля, руб./км; $c_{\text{пу}}$ — стоимость комплекта промежуточных усилителей на $v$ каналов; $n'$ — количество

СТОИМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНОГО КАБЕЛЯ МОСТОВЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

| Количество усилителей мостового типа, устанавливаемых на соединительном кабеле | Стоимость, руб. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | стативов усилителей и их монтажа | установки и монтажа усилителей | электрической проверки и настройки усилителей | всего (величина $b$) |
| 5 | 885 | 27 | 133 | 1 045 |
| 10 | 885 | 54 | 266 | 1 204 |
| 20 | 885 | 107 | 532 | 1 524 |
| 30 | 1 770 | 161 | 798 | 2 728 |
| 50 | 2 655 | 268 | 1 330 | 4 252 |
| 60 | 2 655 | 322 | 1 596 | 4 572 |
| 90 | 4 424 | 482 | 2 394 | 7 301 |
| 100 | 4 424 | 536 | 2 650 | 7 620 |
| 120 | 5 309 | 643 | 3 192 | 9 144 |
| 150 | 7 079 | 804 | 3 990 | 12 673 |
| 160 | 7 964 | 965 | 4 778 | 13 716 |
| 200 | 8 848 | 1 072 | 5 320 | 15 240 |
| 210 | 9 733 | 1 126 | 5 586 | 16 445 |
| 240 | 10 618 | 1 286 | 6 384 | 18 288 |
| 270 | 12 368 | 1 447 | 7 182 | 21 017 |
| 300 | 13 273 | 1 608 | 7 980 | 22 861 |
| 330 | 15 042 | 1 769 | 8 778 | 25 589 |
| 360 | 15 927 | 1 930 | 9 576 | 27 433 |
| 390 | 17 697 | 2 090 | 10 374 | 30 162 |
| 400 | 17 697 | 2 144 | 10 640 | 30 481 |
| 420 | 18 582 | 2 251 | 11 172 | 32 005 |
| 450 | 20 351 | 2 412 | 11 970 | 34 733 |
| 480 | 21 236 | 2 573 | 12 768 | 36 577 |
| 500 | 22 121 | 2 680 | 13 300 | 38 101 |
| 510 | 23 006 | 2 734 | 13 566 | 39 305 |
| 540 | 23 891 | 2 894 | 14 364 | 41 149 |
| 570 | 25 660 | 3 055 | 15 162 | 43 878 |
| 600 | 26 545 | 3 216 | 15 960 | 45 721 |

промежуточных усилителей; $C_{ок}$ стоимость одного комплекта оконечной аппаратуры высокочастотного уплотнения на $v$ каналов, руб.

Данные о величинах $c_4$ приведены в табл. 8.3, о величинах $c_{ну}$ — в табл. 8.4, о величинах $C_{ок}$ в табл. 8.5. Данные по-

Таблица 8.3

СТОИМОСТЬ КАБЕЛЯ ТИПА МКСГ, ЕГО ПРОКЛАДКИ, МОНТАЖА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

| Емкость кабеля | Стоимость, руб./км | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | кабеля | прокладки кабеля | монтажа муфт | измерений | | | | итого (величина $c_4$) |
| | | | | сопротивлений изоляции, жил и асимметрии | переходного затухания | | входного сопротивления | |
| | | | | | на ближнем конце | на дальнем конце | | |
| 1×4 | 330 | 78,5 | 23,6 | 0,05 | 9,2 | 604 | 219 | 1264 |
| 4×4 | 810 | 99,9 | 30 | 0,18 | 9,2 | 604 | 849 | 2398 |
| 7×4 | 1260 | 99,9 | 37,2 | 0,32 | 9,2 | 604 | 1478 | 3489 |

Таблица 8.4

СТОИМОСТЬ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ АППАРАТУРЫ ВЧ УПЛОТНЕНИЯ

| Число каналов | Стоимость, руб. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | стойки СПУ | монтажа стойки СПУ | электрической проверки и настройки оборудования | настройки групповых и линейных трактов | итого (величина $c_{пу}$ | |
| 30 | 921 | 8 | 37 | 376 | 1 342 | |
| 60 | 921 | 8 | 37 | 752 | 1 718 | |
| 90 | 1842 | 16 | 75 | 1128 | 3 060 | |
| 120 | 1842 | 16 | 75 | 1504 | 3 436 | |
| 150 | 2763 | 23 | 112 | 1880 | 4 779 | |
| 180 | 2763 | 23 | 112 | 2256 | 5 155 | |
| 210 | 3684 | 31 | 150 | 2632 | 6 497 | |
| 240 | 3684 | 31 | 150 | 3008 | 6 873 | |
| 270 | 4605 | 39 | 187 | 3384 | 8 215 | |
| 300 | 4605 | 39 | 187 | 3760 | 8 591 | |
| 330 | 5526 | 47 | 224 | 4136 | 9 933 | |
| 360 | 5526 | 47 | 224 | 4512 | 10 309 | |
| 390 | 6447 | 55 | 262 | 4888 | 11 651 | |
| 420 | 6447 | 55 | 262 | 5264 | 12 027 | |
| 450 | 7368 | 62 | 299 | 5640 | 13 370 | |
| 480 | 7368 | 62 | 299 | 6016 | 13 746 | |
| 510 | 8289 | 70 | 337 | 6392 | 15 088 | |
| 540 | 8289 | 70 | 337 | 6768 | 15 464 | |
| 570 | 9210 | 78 | 374 | 7144 | 16 806 | |
| 600 | 9210 | 78 | 374 | 7520 | 17 182 | |

лучены из прейскурантов 15-09, 18-02 и ценников №№8 и 10. Количество промежуточных усилительных пунктов может быть определено как ближайшее большее целое число отношения

$$n' = \left[\frac{l}{l_{уу}}\right] - 1, \qquad (8.6)$$

где $l_{уу}$ — длина усилительного участка. При применении аппаратуры КРР (КАМА) $l_{уу} = 13$ км; при $l < 13$ км величина $n' = 0$.

На основе приведенных формул нетрудно составить алгоритм и программу выбора наиболее дешевого способа организации межстанционной связи. В качестве исходных данных вводятся зависимости различного вида стоимостей от требуемого количества линий или каналов, представленные в табл. 8.1 — 8.5. Переменной величиной является также расстояние $l$ между станциями.

Алгоритм позволяет при каждом $v$ и $l$ рассчитать наиболее рациональный способ организации межстанционной связи, стоимость этого способа, количество применяемых усилителей. Наиболее дешевый способ закодирован четырьмя цифрами: 1 — с применением кабеля с диаметром жил 0,4 мм; 2 — то же, с диаметром жил 0,5 мм; 3 — то же, с диаметром жил 0,7 мм; 4 — высокочастотное уплотнение. Программа обеспечивает вывод на печать всех данных, характеризующих следующий за оптимальным вариант организации межстанционной связи. Это позволяет установить выигрыш от применения оптимального варианта (или проигрыш, если по каким-либо причинам оптимальный вариант не используется), а также оценить степень устойчивости принятого варианта.

Блок-схема программы, разработанной для ЭВМ «Паири», приведена на рис. 8.1. Расчеты по этой программе проводились при следующих данных: число столбцов матриц — 23 ($v$=5; 10; 20; 30; 50; 60; 90; 100; 120; 150; 180; 200; 210; 240; 270; 300; 330; 360; 390; 400; 420; 500; 600; шаг изменения расстояния — 1,1; $l_{мин}$ — 5 км; $l_{макс}$ = 90 км; $n_{мин}$ = 6: $\alpha_1$ — 1,68 дБ/км; $\alpha_2$ = 1,26 дБ/км; $\alpha_3$ — 0,84 дБ/км; $A$ — 17,3 дБ; $l_{уу}$ — 13 км. Величина усиления мостового усилителя $s$ = 4,35 дБ.

На основе данных расчета построены диаграммы распределения областей оптимальных (рис. 8.2) и подоптимальных (рис. 8.3) решений по организации межстанционной связи. Напомним, что рассматриваются четыре варианта такой связи с применением мостовых усилителей на кабелях с диаметром жил 0,4; 0,5 и 0,7 мм, а также аппаратуры высокочастотного уплотнения.

СТОИМОСТЬ ОКОНЕЧНОЙ АППАРАТУРЫ ТИПА КРР НА ОДНУ СТАНЦИЮ

| Наименование | Число | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
| Статив СИГ-1 | 5 939 | 5 939 | 5 939 | 5 939 | 11 878 | 11 878 | 11 878 | 11 878 | 17 817 |
| Монтаж СИГ-1 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 26,6 | 26,6 | 26,6 | 26,6 | 39,9 |
| Электрическая проверка и настройка СИГ-1 | 129 | 129 | 129 | 129 | 258 | 258 | 258 | 258 | 387 |
| Статив СИГ-30 | | 4 098 | 8 196 | 12 294 | 12 294 | 16 392 | 20 490 | 24 588 | 24 588 |
| Монтаж СИГ-30 | — | 17,4 | 34,8 | 52,2 | 52,2 | 69,6 | 87 | 104,4 | 104,4 |
| Электрическая проверка и настройка СИГ-30 | — | 91 | 182 | 273 | 273 | 364 | 455 | 546 | 546 |
| Статив РСЛУ | 594 | 891 | 1 485 | 1 782 | 2 376 | 2 673 | 3 267 | 3 564 | 4 158 |
| Комплект РСЛУ | 510 | 1 020 | 1 530 | 2 040 | 2 550 | 3 060 | 3 570 | 4 080 | 4 590 |
| Настройка линейных и групповых трактов | 1 421 | 2 842 | 4 263 | 5 684 | 7 105 | 8 526 | 9 947 | 11 368 | 12 789 |
| Монтаж РСЛУ | 23,2 | 34,8 | 58 | 69,6 | 92,8 | 104,4 | 127,6 | 139,2 | 162,4 |
| Итого | 8 629 | 15 075 | 21 830 | 28 276 | 36 906 | 43 352 | 50 106 | 56 552 | 65 180 |



Таблица 8.5

(ВЕЛИЧИНА $C_{ок}$), РУБ., ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА КАНАЛОВ

| каналов | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 510 | 540 | 570 | 600 |
| 17 817 | 17 817 | 17 817 | 23 756 | 23 756 | 23 756 | 23 756 | 29 695 | 29 695 | 29 695 | 29 695 |
| 39,9 | 39,9 | 39,9 | 53,2 | 53,2 | 53,2 | 53,2 | 66,5 | 66,5 | 66,5 | 66,5 |
| 387 | 387 | 387 | 516 | 516 | 516 | 516 | 645 | 645 | 645 | 645 |
| 28 686 | 32 784 | 36 882 | 36 882 | 40 980 | 45 078 | 49 176 | 49 176 | 53 274 | 57 372 | 61 470 |
| 121,8 | 139,2 | 156,6 | 156,6 | 174 | 191,4 | 208,8 | 208,8 | 226,2 | 243,6 | 261 |
| 637 | 728 | 819 | 819 | 910 | 1 001 | 1 092 | 1 092 | 1 183 | 1 274 | 1 365 |
| 4 455 | 5 049 | 5 346 | 5 940 | 6 237 | 6 831 | 7 128 | 7 722 | 8 019 | 8 613 | 8 910 |
| 5 100 | 5 610 | 6 120 | 6 630 | 7 140 | 7 650 | 8 160 | 8 670 | 9 180 | 9 690 | 10 200 |
| 14 210 | 15 631 | 17 052 | 18 473 | 19 894 | 21 315 | 22 736 | 24 157 | 25 578 | 26 999 | 28 420 |
| 174 | 197,2 | 208,8 | 232 | 243,6 | 266,6 | 278,4 | 302,6 | 313,2 | 336,4 | 348 |
| 71 728 | 78 382 | 84 828 | 93 458 | 99 904 | 106 658 | 113 104 | 121 734 | 128 180 | 134 934 | 141 380 |

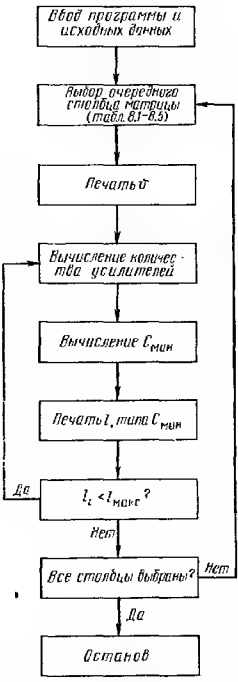



Рис. 8.1. Блок-схема программы выбора оптимального способа организации межстанционной связи

Из рис. 8.2 следует: что:

1) до расстояния $l \sim A/\alpha$ [1]) = 10,3 км целесообразно применять кабели с диаметром жил 0,4 мм без усилителей; эта область является единственной, где оптимальность организации связи зависит только от расстояния и не зависит от емкости кабеля;

2) начиная с расстояния 10,3 км и до расстояния 23—59 км (в зависимости от емкости кабеля), целесообразно прокладывать кабель с диаметром жил 0,5 мм с установкой усилителей; на отдельных участках выгоднее использовать кабель с диаметром жил 0,7 мм;

3) начиная с расстояния 23—59 км (в зависимости от количества требуемых связей), оптимально применение аппаратуры вч уплотнения.

Подоптимальные (ближайшие к оптимальным) варианты организации межстанционной связи следующие:

1) до расстояния 10,3 км — кабели с диаметром жил 0,5 мм;

2) на расстоянии от 10,3 до 18—22 км — мостовые усилители, установленные на кабелях с диаметром жил 0,4 мм;

3) на расстоянии от 18 до 30—33 км — кабели с диаметром жил 0,7 мм; однако при некотором количестве связей применение усилителей на кабелях с диаметром жил 0,4—0,5 мм, а также высокочастотного уплотнения оказывается более целесообразным, чем кабелей с диаметром жил 0,7 мм;

4) на расстоянии от 30—33 до 37 км — мостовые усилители на кабелях с диаметром жил 0,5 мм;

5) на расстоянии от 33—37 до 37—54 км вновь усилители на кабелях с диаметром жил 0,7 мм;

6) при расстояниях свыше 37—59 км подоптимальных вариантов нет; здесь возможно применение только аппаратуры высокочастотного уплотнения.

Как указывалось выше, диаграммы, приведенные на рис. 8.2 и 8.3, построены на основе расчетных данных, полученных таким об-

[1]) Предусматривается применение РСЛ, которые допускают работу по сл с омическим сопротивлением до 3000 Ом.

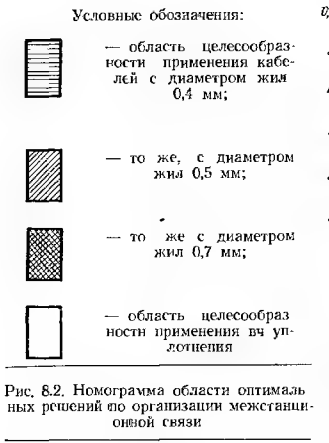



Рис. 8.2. Номограмма области оптимальных решений по организации межстанционной связи

разом, что каждое последующее расстояние было больше предыдущего на 10% (шаг изменения расстояния 1,1).

Неравномерный ход изменения расстояния вполне оправдан, так как в начальной и конечной областях исследований изменений решений не наблюдается. Для более детального установления границ областей целесообразности применения отдельных технических решений указанный шаг может быть принят равным 1,05; 1,03 или даже 1,01. Границы исследуемой области, как видно из рис. 8.2 и 8.3, могут быть сужены до участка от 10 до 40 км (вместо 5—90км в приведенном расчете).

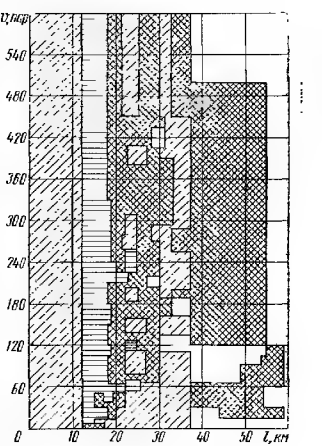



Рис. 8.3. Номограмма области подоптимальных решений по организации межстанционной связи

Примечание. Условные обозначения см. на рис. 8.2

Введение дополнительных значений емкостей в интервале до 420 связей не может дать дополнительной информации, так как эти значения дискретны (по емкости кабелей и аппаратуры высокочастотного уплотнения) и до появления кабелей с другими номинальными значениями числа пар (четверок) или аппаратуры уплотнения с четырнадцатиканальными блоками изменение диаграмм на рис. 8.2 и 8.3 по вертикали произойти не может. При числе связей свыше 420 можно рассмотреть дополнительные значения: 450; 510; 540; 570 и т. д.

В заключение рассмотрим корреляционные функции данных, приведенных в табл. 8.1—8.5, которые упоминались в гл.7 и потребуются ниже.

В ф-лах (8.7)—(8.15) стоимость измеряется в тысячах рублей, а $v$ — в количестве пар кабеля или высокочастотных каналов.

Стоимость одного километра кабеля типа ТПП как функция его емкости выражается следующим образом:

при диаметре токоведущей жилы 0,4 мм

$$c_1 = 0{,}282 + 0{,}00867v - 0{,}00000148v^2; \tag{8.7}$$

при диаметре жилы 0,5 мм

$$c_2 = 0{,}290 + 0{,}00974v - 0{,}00000184v^2; \tag{8.8}$$

при диаметре жилы 0,7 мм

$$c_3 = 0{,}302 + 0{,}0157v - 0{,}00000171v^2. \tag{8.9}$$

Корреляционные отношения ф-л (8.7)—(8.9) выше 0,9998. Важнейшей особенностью этих формул является отрицательная величина коэффициента при $v^2 (a_2 < 0)$, что, как указывалось в гл. 7, является решающим фактором при решении вопроса о количестве кабелей, прокладываемых в заданном направлении. Стоимость одного километра кабеля типа МКСГ как функция его емкости, выраженной в парах, может быть представлена в виде

$$c_4 = 0{,}877 + 0{,}195v - 0{,}000593\,v^2. \tag{8.10}$$

Стоимость мостовых усилителей при числе линий до 240 выражается как

$$b_{240} = 0{,}356 + 0{,}076v - 0{,}0000033v^2, \tag{8.11}$$

а при числе линий свыше 270

$$b_{270} = 0{,}789 + 0{,}074v + 0{,}00000251\,v^2. \tag{8.12}$$

Корреляционные отношения ф-л (8.11) и (8.12) выше 0,998.

Стоимость оконечной аппаратуры высокочастотного уплотнения описывается формулой (на одну станцию):

$$C_{ок} = 1{,}29 + 0{,}233v + 0{,}000001\,v^2. \tag{8.13}$$

Корреляционное отношение этой формулы примерно 0,9999. Если рассмотреть обе оконечные станции, то стоимость оконечного обо-

рудования выражается линейной зависимостью с коэффициентом корреляции, равным 0,999:

$$C_{ок} = 1{,}95 + 0{,}47v. \tag{8.14}$$

Стоимость одного промежуточного усилительного пункта аппаратуры КРР

$$c_{пу} = 2{,}280 + 0{,}0285v. \tag{8.15}$$

Коэффициент корреляции этой формулы 0,9988.

Весьма хорошую аппроксимацию функции стоимости одного километра кабеля в зависимости от его емкости по данным табл. 8.1 дают прямые:

$$c_1 = 0{,}327 + 0{,}00785v; \tag{8.7'}$$

$$c_2 = 0{,}348 + 0{,}00872v; \tag{8.8'}$$

$$c_3 = 0{,}355 + 0{,}0147v. \tag{8.9'}$$

Коэффициенты корреляции этих формул соответственно равны 0,899; 0,999 и 0,999, а ошибки аппроксимации - 6,6; 7,1; 5,4%.

Для остальных зависимостей линейные приближения имеют вид:

$$c_4 = 0{,}900 + 0{,}185\,\frac{V}{x}; \tag{8.10'}$$

$$b_{240} = 0{,}380 + 0{,}075v; \tag{8.11'}$$

$$b_{270} = 0{,}338 + 0{,}076v; \tag{8.12'}$$

$$C_{ок} = 0{,}983 + 0{,}235v, \tag{8.13'}$$

где $x$ — количество каналов, которое можно образовать по одной паре.

Таблица 8.6

ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ $a_0$, $a_1$, $a_2$ И ИХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

| Тип кабеля и диаметр жил, мм | Значения коэффициентов при зависимостях | | | | | Отношения коэффициентов при зависимостях | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | линейной | | квадратической | | | линейной | квадратичной | | |
| | $a_0$ | $a_1$ | $a_0$ | $a_1$ | $-a_2 \cdot 10^{-6}$ | $\frac{a_0}{a_1}$ | $\frac{a_1}{a_2}$ | $\frac{a_0}{a_2} \cdot 10^{6}$ | $\frac{a_0}{a_1}$ |
| Низкочастотный, 0,4 | 0,327 | 0,00785 | 0,282 | 0,00867 | 1,48 | 41,6 | 5858 | 0,19 | 32,5 |
| То же, 0,5 | 0,348 | 0,00872 | 0,290 | 0,00971 | 1,84 | 39,9 | 5293 | 0,16 | 29,8 |
| То же, 0,7 | 0,355 | 0,0147 | 0,302 | 0,0157 | 1,71 | 24,1 | 9170 | 0,18 | 19,2 |
| Высокочастотный, 1,2 | 0,900 | 0,185 | 0,877 | 0,195 | 593 | 4,85 | 1520 | 0,0003 | 4,55 |

Коэффициенты корреляции ф-л (8.10)—(8.13) выше 0,999; ошибки аппроксимации соответственно равны: 0,45; 6,6; 0,67; 1%.

В дальнейшем будут использоваться отношения коэффициентов линий регрессии: $a_1/a_2$; $a_0/a_2$ и $a_0/a_1$ для квадратичной формы зависимости и отношение $a_0/a_1$ — для линейной. Для удобства пользования величины этих отношений, полученные по ф-лам (8.7)—(8.10), приведены в табл. 8.6.

С помощью описанной выше программы расчета на ЭВМ оптимальных вариантов организации межстанционной связи можно просчитать эти варианты при разных величинах затухания, отводимых на рассматриваемый участок сети, и составить соответствующий каталог.

## 8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАТС

Строительство ПАТС на том или ином промышленном предприятии часто производится, исходя из необходимости образования системы производственной связи и обеспечения общезаводской (комбинатской, шахтной и т. п.) связи. Однако решение об организации на каждом конкретном предприятии ПАТС может подкрепляться технико-экономическими расчетами: определяются целесообразность размещения на предприятии самостоятельной (отдельной от городской) АТС и количество ПАТС на территории предприятия и их емкостн.

*Определение целесообразности использования на предприятии самостоятельной АТС.* Рассматриваются два варианта организации связи:

1. Предприятие обслуживается от городской АТС емкостью $N_{\text{ГАТС}_1}$, от которой в район предприятия прокладывается магистральный кабель емкостью $v_{\text{маг}}$.

2. Предприятие обслуживается от самостоятельной ПАТС емкостью $N_{\text{ПАТС}}$, которая соединяется с городской АТС емкостью $N_{\text{ГАТС}_2}$ кабелем соединительных линий емкостью $v_{\text{сл}}$. При этом допускается, что: а) при обслуживании предприятия от городской станции в месте возможного размещения ПАТС устанавливается распределительный шкаф; это дает возможность при сравнении вариантов не принимать во внимание распределительные сети; б) связь ПАТС с междугородной телефонной станцией организуется через ГТС по соединительному кабелю ПАТС-ГАТС; в) кабели связи прокладываются в готовой телефонной канализации.

Схемы организации связи по обоим вариантам приведены на рис. 8.4. Вначале составим функции капитальных затрат. Стоимость каждого номера станционных устройств для включения абонентов предприятия принимается равной:

а) при обслуживании с городской станции — соответствующей стоимости одного номера данной ГАТС, исходя из ее номерной ем-

кости с учетом количества подключаемых абонентов предприятия, т. е.

$$N_{\text{I ГАТС}_1} = N_{\text{ГАТС}_2} + N_{\text{ПАТС}}. \tag{8.16}$$

Величина $N_{\text{ГАТС}_1}$ округляется до ближайшего большого числа, кратного тысяче;

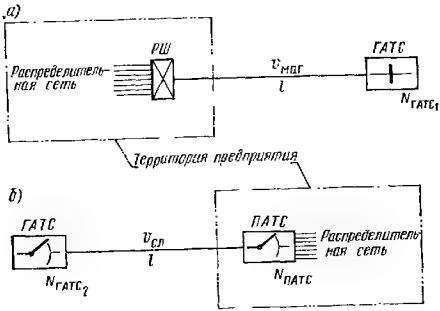



Рис. 8.4. К определению целесообразности размещения на предприятии самостоятельной ПАТС:
*а)* внутрипроизводственная связь осуществляется через ГАТС; *б)* внутрипроизводственная связь осуществляется через ПАТС

б) при обслуживании с самостоятельной АТС – соответствующей стоимости одного номера данной ПАТС, исходя из ее номерной емкости.

Стоимость одного номера декадно-шаговых городских АТС может быть определена по укрупненным показателям института «Гипросвязь», приведенным в табл. 8.7.

Корреляционная обработка этих данных позволила получить следующие зависимости:

а) для двух ступеней группового искания:

$$y_{\text{общ}} = 242 - 0{,}166N - 0{,}124N^2; \tag{8.17}$$

$$y_1 = 152 - 1{,}53N + 0{,}00780N^2; \tag{8.18}$$

$$y_2 = 48{,}7 - 0{,}089N + 0{,}0005N^2; \tag{8.19}$$

$$y_3 = 6{,}78 - 0{,}140N + 0{,}00121N^2; \tag{8.20}$$

$$y_4 = 10{,}3 + 1{,}69N - 0{,}0252N^2; \tag{8.21}$$

$$y_5 = 23{,}8 - 0{,}0064N - 0{,}00136N^2. \tag{.22)}$$

Таблица 8.7

УКРУПНЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТОИМОСТИ ОДНОГО НОМЕРА ГОРОДСКИХ ДЕКАДНО-ШАГОВЫХ АТС

| Емкость станции, номеров | Стоимость одного номера, руб. | В том числе на | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | линейные сооружения | станционные сооружения | энергоснабжение | гражданские сооружения | прочие затраты |
| *Две ступени группового искания* | | | | | | |
| 2000 | 230,5 | 125,6 | 47,1 | 4,6 | 30,4 | 22,8 |
| 3000 | 231,4 | 112,0 | 46,4 | 3,4 | 46,7 | 22,9 |
| 4000 | 215,5 | 100,2 | 45,9 | 3,1 | 34,1 | 21,4 |
| 5000 | 196,2 | 100,2 | 45,5 | 3,1 | 28,0 | 19,4 |
| 6000 | 190,1 | 86,2 | 45,1 | 2,6 | 23,4 | 18,8 |
| *Три ступени группового искания* | | | | | | |
| 3000 | 269,0 | 112,0 | 58,7 | 3,4 | 55,9 | 25,1 |
| 4000 | 249,7 | 100,2 | 56,3 | 3,1 | 42,1 | 23,3 |
| 5000 | 222,4 | 100.2 | 53,2 | 3,1 | 33,7 | 20,8 |
| 6000 | 212,2 | 86,2 | 50,1 | 2,6 | 28,1 | 19,8 |
| 7000 | 190,9 | 86,2 | 49,1 | 2,3 | 24,1 | 17,8 |
| 8000 | 186,1 | 86,2 | 48,0 | 2,0 | 21,1 | 17,4 |
| 9000 | 182,5 | 86,2 | 47,6 | 1,8 | 18,5 | 17,0 |

б) для трех ступеней группового искания:

$$y_{общ} = 370 - 3{,}9N + 0{,}02N^2; \quad (8.23)$$

$$y_1 = 153 - 1{,}67N + 0{,}0103N^2; \quad (8.24)$$

$$y_2 = 72{,}6 - 0{,}538N + 0{,}00288N^2; \quad (8.25)$$

$$y_3 = 4{,}06 - 0{,}0193N - 0{,}00007N^2; \quad (8.26)$$

$$y_4 = 99{,}9 - 1{,}82N + 0{,}0103N^2; \quad (8.27)$$

$$y_5 = 34{,}4 - 0{,}361N + 0{,}00184N^2. \quad (8.28)$$

В ф-лах (8.17) -(8.28): $y_{общ}$ общая величина затрат на один номер, руб.; $y_1$ - затраты на линейные сооружения, отнесенные на один номер, руб.; $y_2$, $y_3$, $y_4$, $y_5$ — аналогичные затраты соответственно на станционные сооружения, энергоснабжение, гражданские сооружения и прочие расходы, руб.; $N$ — емкость ГАТС, выраженная в сотнях номеров.

Корреляционные отношения ф-л (8.17) и (8.23) соответственно равны 0,96 и 0,99; ф-л (8.18)—(8.22) — 0,97; 0,99; 0,95; 0,79; 0,96; а ф-л (8.23)—(8.28) — 0,96; 0,99; 0,98; 0,99 и 0,99.

Относительное увеличение стоимости одного номера при добавлении одной ступени группового искания может быть выражено формулой:

$$\Delta y = 1{,}176 + 0{,}00045N - 0{,}000025N^2. \qquad (8.29)$$

Среднее значение величины $\Delta y = 1{,}14$, т. е. в среднем стоимость одного номера при добавлении одной ступени группового искания увеличивается на 14%.

Капитальные затраты на один номер при организации связи по первому варианту будут равны

$$C_1 = c_{\text{об. ГАТС}_i} + \frac{c_{\text{маг}}\, l}{N_{\text{ПАТС}}}, \qquad (8.30)$$

где $c_{\text{об ГАТС}_i}$ — стоимость одного номера станционных устройств ГАТС по первому варианту ($y_2$—$y_5$), руб.; $c_{\text{маг}}$ — стоимость 1 км магистрального кабеля, руб./км; $l$ — расстояние между ГАТС и распределительным шкафом на предприятии, км; $N_{\text{ПАТС}}$ — количество абонентов ГАТС на предприятии.

Стоимость одного номера станционных устройств ГАТС может быть выражена с учетом (8.19)—(8.22) и (8.25)—(8.28) следующим образом:

$$c_{\text{об. ГАТС}_i} = \gamma_0 + \gamma_1 N_{\text{ГАТС}} - \gamma_2 N^2_{\text{ГАТС}_i}, \qquad (8.31)$$

где $\gamma_i$ — коэффициенты линии регрессии, определяемые из ф-л (8.19)—(8.22) для двух ступеней группового искания:

$$\gamma_0 = 89{,}6;\ \gamma_1 = 1{,}46;\ \gamma_2 = 0{,}02485, \qquad (8.32)$$

и из ф-л (8.25)—(8.28) для трех ступеней группового искания:

$$\gamma_0 = 210{,}96;\ \gamma_1 = -2{,}74;\ \gamma_2 = -0{,}015. \qquad (8.32')$$

Часто при сравнении вариантов не учитываются гражданские сооружения, энергоснабжение и прочие затраты. Тогда коэффициенты $\gamma_0$, $\gamma_1$ и $\gamma_2$ соответственно равны:

а) при двух ступенях группового искания:

$$\gamma_0 = 48{,}7;\ \gamma_1 = -0{,}089;\ \gamma_2 = 0{,}0005; \qquad (8.33)$$

б) при трех ступенях группового искания:

$$\gamma_0 = 72{,}6;\ \gamma_1 = -0{,}538;\ \gamma_2 = 0{,}00288. \qquad (8.33')$$

Стоимость 1 км магистрального кабеля

$$c_{\text{маг}} = a_2 v^2_{\text{маг}} + a_1 v_{\text{маг}} + a_0, \qquad (8.34)$$

где $v_{\text{маг}}$ — количество занятых пар в магистральном кабеле с учетом эксплуатационного и конструктивных запасов; $a_2$, $a_1$, $a_0$ — коэффициенты, определяющие стоимость кабеля.

С учетом (8.31) и (8.34) ф-ла (8.30) имеет вид:

$$C_1 = \gamma_0 + \gamma_1 N_{\text{ГАТС}_i} - \gamma_2 N_{\text{ГАТС}_i} + (a_2 v^2_{\text{маг}} + a_1 v_{\text{маг}} + a_0)\frac{l}{N_{\text{ПАТС}}}. \qquad (8.30')$$

Функция капитальных затрат при обслуживании предприятия от самостоятельной станции может быть представлена следующим образом:

$$C_2 = c_{\text{об. ПАТС}} + c_{\text{сл}} + c_{\text{ГАТС}_{\text{сл}}}, \qquad (8.35)$$

где $c_{\text{об ПАТС}}$ стоимость одного номера станционных устройств ПАТС, исходя из ее типа и емкости; $c_{\text{сл}}$ стоимость прокладки кабеля соединительных линий ПАТС-ГАТС, отнесенная на один абонентский номер ПАТС; $c_{\text{ПАТС}_{\text{сл}}}$ — стоимость включения соединительных линий на стороне ГАТС, отнесенная на один абонентский номер ПАТС.

Стоимость одного номера собственно станционных устройств ПАТС была установлена нами выше (см. гл. 4 и гл. 7). С учетом затрат на энергоснабжение стоимость одного номера декадно-шаговых АТС определяется формулой:

$$c_{\text{об. ПАТС}} = 32{,}95 + \frac{2225}{N_{\text{ПАТС}}}, \qquad (8.36)$$

где $N_{\text{ПАТС}}$ — емкость ПАТС, номера.

Формула (8.36) справедлива для первой группы строек и первых десяти территориальных районов.

Стоимость прокладки кабеля соединительных линий ПАТС-ГАТС, отнесенная на один абонентский номер ПАТС, может быть выражена следующим образом:

$$c_{\text{сл}} = (a_2 v_{\text{сл}}^2 + a_1 v_{\text{сл}} + a_0)\frac{l}{N_{\text{ПАТС}}}, \qquad (8.37)$$

где $v_{\text{сл}}$ — емкость соединительного кабеля ПАТС-ГАТС с учетом всех видов линий.

Стоимость включения соединительных линий на стороне ГАТС, отнесенная к одному номеру ПАТС,

$$c_{\text{ГАТС}_{\text{сл}}} = \frac{n_{\text{экв}}}{N_{\text{ПАТС}}} C_{\text{об. ГАТС}_2}, \qquad (8.38)$$

где $n_{\text{экв}}$ — эквивалентная емкость соединительных линий, определяемая как:

$$n_{\text{экв}} = v_{\text{сл}} \frac{y_{\text{сл}}}{y_{\text{аб}}}. \qquad (8.39)$$

$y_{\text{сл}}$ — нагрузка, поступающая по соединительной линии;

$y_{\text{аб}}$ — нагрузка на одну абонентскую линию;

$C_{\text{об ГАТС 2}}$ — стоимость одного номера станционных устройств ГАТС (с учетом гражданских сооружений и устройств электроснабжения), исходя только из ее емкости. Эта стоимость может быть определена по формуле

$$c_{\text{об. ГАТС}_2} = \gamma_0 + \gamma_1 N_{\text{ГАТС}_2} - \gamma_2 N_{\text{ГАТС}_2}^2, \qquad (8.40)$$

где $\gamma_0$, $\gamma_1$, $\gamma_2$ — коэффициенты, определенные выше.

Для практических расчетов можно принять, что отношение нагрузки по соединительной линии к нагрузке по абонентской линии равно 8, т. е.

$$n_{экв} = 8v_{сл}$$

Учитывая (8.39) и (8.40), ф-лу (8.38) можно представить в виде

$$c_{ГАТС_{сл}} = \frac{v_{сл}}{N_{ПАТС}}\left[\frac{y_{сл}}{y_{аб}}(\gamma_0 + \gamma_1 N_{ГАТС_2} - \gamma_2 N_{ГАТС_2})\right]. \quad (8.38')$$

Принимая во внимание (8.36), (8.37) и (8.38), функцию капитальных затрат при обслуживании предприятия от самостоятельной станции можно выразить как

$$C_2 = 32{,}95 + \frac{2225}{N_{ПАТС}} + (a_2 v_{сл}^2 + a_1 v_{сл} + a_0)\frac{l}{N_{ПАТС}} + \\ + \frac{v_{сл}}{N_{ПАТС}}\left[\frac{y_{сл}}{y_{аб}}(\gamma_0 + \gamma_1 N_{ГАТС_2} + \gamma^2 N_{ГАТС_2})\right]. \quad (8.41)$$

Формула (8.41) справедлива для ПАТС декадно-шаговой системы. Коэффициенты $\gamma_0$, $\gamma_1$, $\gamma_2$ при этом не учитывают затрат на гражданские сооружения. Если затраты на гражданские сооружения ПАТС известны, то они должны быть отнесены к одному номеру ПАТС и приплюсованы к ф-ле (8.41), а коэффициенты $\gamma_0$, $\gamma_1$ и $\gamma_2$ в этом случае следует принять в соответствии с ф-лами (8.32) и (8.32′).

Формулы (8.30)′ и (8.41) определяют величины капитальных затрат по рассматриваемым вариантам. Величина эксплуатационных расходов при организации связи от городской АТС может быть оценена формулой

$$Э_1 = \varphi N_{ПАТС}. \quad (8.42)$$

где $\varphi$ — стоимость годовой эксплуатации одной абонентской линии с аппаратом; в качестве ее можно принять величину годовой арендной платы.

При организации самостоятельной ПАТС величина эксплуатационных затрат составит

$$Э_2 = Э_{ПАТС} + \varphi' v_{сл}, \quad (8.43)$$

где $Э_{ПАТС}$ - годовые эксплуатационные расходы на обслуживание ПАТС, которые достаточно подробно были рассмотрены в предыдущей главе.

Приведенные затраты по каждому из рассматриваемых вариантов определяются по ф-ле (5.3′). Экономически целесообразен тот вариант, приведенные затраты по которому имеют меньшую величину.

*Определение количества ПАТС на предприятии и их емкости.* Рассмотрим приведенные затраты сети производственных автоматических телефонных станций как функцию числа станций $n$:

$$П = (Э_{сл} + Э_{об} + Э_{ас}) + E_н(C_{сл} + C_{об} + C_{лс}), \quad (8.44)$$

где $Э_{сл}$, $С_{сл}$ — соответственно эксплуатационные затраты на строительство сети соединительных линий между ПАТС; $Э_{об}$, $С_{об}$ — то же, на оборудование ПАТС; $Э_{лс}$, $С_{лс}$ — то же, на сооружение магистральной и распределительной сетей.

Капитальные затраты на строительство сети соединительных линий между ПАТС зависят от числа и емкости станций, расстояний между ними, способа организации межстанционной связи на каждом участке и схемы соединения станций между собой. Таким образом, стоимость строительства сети соединительных линий может быть определена в результате решения задачи узлообразования, которой посвящен следующий раздел данной главы. Эта стоимость (как в целом, так и в расчете на один номер сети) существенно возрастает с увеличением числа станций:

$$C_{сл} = (s_2 n^2 + s_1 n + s_0)\frac{1}{N}, \qquad (8.45)$$

где $C_{сл}$ — стоимость сети соединительных линий, отнесенная на один номер сети; $N$ — емкость сети:

$$N = \sum_{i=1}^{n} N_i \qquad (8.46)$$

где $N_i$ — емкость каждой отдельной станции.

Коэффициенты $s_0$, $s_1$, $s_2$ выводятся, исходя из анализа оптимальных решений по построению сети межстанционной связи и не должны зависеть от $n$.

Стоимость оборудования ПАТС, отнесенная на один номер сети, может быть представлена в виде

$$C_{об} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(b_2 N_i^2 + b_1 N_i + b_0)\theta, \qquad (8.47)$$

где $\theta$ — коэффициент, учитывающий долю стоимости оборудования в общей величине капитальных затрат. Поскольку при $N = \text{const}$ стоимость оборудования одной станции меньше стоимости оборудования двух станций (это можно доказать аналогично тому, как это было сделано в гл. 7 для кабелей связи), величина $C_{об}$ с увеличением числа $n$ будет возрастать. Учитывая равенство (8.46), можно сделать вывод о том, что емкости $N_i$ будут при этом соответственно уменьшаться (рис. 8.5).

Наибольшие затруднения вызывает выражение стоимости сети линейных сооружений от количества станций. Нетрудно видеть, что при постоянстве емкости сети протяженность кабельных линий при увеличении числа станций будет уменьшаться, так как в данном случае уменьшается расстояние от станции до абонента. Однако установить, в какой мере будет происходить уменьшение, очень сложно, поскольку это зависит от территории предприятия, ее конфигурации, размещения объектов, телефонной плотности и целого

ряда других факторов. Часто на основе анализа проектных решений зависимость затрат на строительство сети линейных сооружений можно выразить следующим образом:

$$C_{сл} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(r_2 N_i^2 + r_1 N_i + r_0), \qquad (8.48)$$

где $r_0$, $r_1$, $r_2$ — коэффициенты линий регрессии, определяемые точно также, как это неоднократно делалось выше. Выражения (8.45), (8.47) и (8.48) представляют собой функции в основном двух аргументов — количества станций $n$ и емкостей станций $N_i$. Наиболее

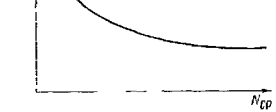



Рис. 8.5. Зависимость стоимости оборудования ПАТС от средней емкости ПАТС

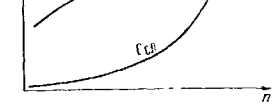



Рис. 8.6. Зависимость стоимости сети соединительных линий, оборудования ПАТС и сети линейных сооружений от числа станций

простое решение можно получить в том случае, когда телефонная плотность равномерна и емкости станций равны между собой. Тогда

$$N = nN_1, \qquad (8.46')$$

где $N_1$ — емкость одной станции. Сумма капитальных затрат при этом будет равна

$$C_{сл} + C_{об} + C_{лс} = \frac{1}{N}\left[s_2 n^2 + s_1 n + s_0 + b_2\theta\frac{N^2}{n} + nb_0\theta + r_2\frac{N^2}{n} + r_1 N + nr_0\right]. \qquad (8.49)$$

Эта функция только одной переменной — числа станций $n$. На рис. 8.6 представлены зависимости отдельных составных частей капитальных затрат при разном количестве станций на сети. Эксплуатационные затраты на обслуживание сети соединительных линий, оборудование ПАТС и сеть линейных сооружений также являются функциями количества станций и их емкости. Эти экс-

плуатационные расходы могут быть определены по ф-ле (7.22). Количество обслуживающего персонала рассчитывается по формулам:

$$R_{\text{сл}} = \left[\frac{z}{174} F(v_{\text{сл}})\right], \text{ чел.;} \tag{8.50}$$

$$R_{\text{об}} = \sum_{i=1}^{n} R_i \text{ чел.;} \tag{8.51}$$

$$R_{\text{лс}} = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{50z}{174} F(N_i)\right], \text{ чел.,} \tag{8.52}$$

где $F(v_{\text{сл}})$ – количество километро-пар кабелей соединительных линий как функция числа станций, их емкости и способа соединения станций между собой; $R_i$ — количество обслуживающего персонала на $i$-й станции по действующим нормативам (см. табл. 7.2); $z$ норматив по обслуживанию 1 км-пары кабельной сети; $F(N_i)$ — количество кабеля в фондовом исчислении в зависимости от емкости станции, км; 174 – баланс рабочего времени в месяц; 50 – коэффициент перевода фондового кабеля в физическое исчисление (км-пары).

При использовании аппаратуры высокочастотного уплотнения и мостовых усилителей ф-ла (8.50) должна быть дополнена соответствующими членами. Для возможности пользования ф-лой (8.44) эксплуатационные расходы должны быть отнесены на один абонентский номер сети. Затраты (капитальные и эксплуатационные) на телефонную канализацию не учитываются, так как можно принять, что при любом числе станций объем строительства ее являются постоянной величиной.

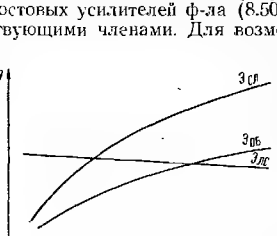



Рис. 8.7. Зависимость эксплуатационных расходов на обслуживание сети соединительных линий, оборудование ПАТС и линейные сооружения от числа станций

На рис. 8.7 представлены зависимости величин эксплуатационных расходов от числа станций на сети. Анализ ф-л (8.49)—(8.52) и рис. 8.6 и 8.7 показывает, что функция приведенных затрат имеет минимум, которому соответствует определенное количество станций $n_{\text{мин}}$. Нахождение этого минимума может быть осуществлено путем дифференцирования функции приведенных затрат по $n$, приравнивания производной нулю и решения полу-

чившегося при этом уравнения относительно $n$. Указанные операции приводят к уравнению вида

$$\frac{2E_{\text{н}}s_2}{N}n^3+\left[\frac{E_{\text{н}}}{N}(s_1+b_0\theta+r_0)+\frac{0{,}015}{N}\frac{d\left(R^2_{\text{сл}}+R^2_{\text{об}}+R^2_{\text{лс}}\right)}{dn}+\right.$$

$$\left.+\frac{1{,}15}{N}\frac{d\left(R_{\text{сл}}+R_{\text{об}}+R_{\text{эс}}\right)}{dn}\right]n^2-(b_2\theta+r_2)E_{\text{н}}N=0, \qquad (8.53)$$

Раскрыв функциональные зависимости $R_{\text{сл}}=f(n)$, $R_{\text{об}}=f(n)$, $R_{\text{сл}}=f(n)$ и приведя необходимые преобразования из (8.53), можно найти искомую величину $n$, зависящую от коэффициентов, которые в общем виде определяются специфическими особенностями рассматриваемой сети ($s$, $b$, $\theta$, $r$), емкостью сети $N$ и нормативным коэффициентом эффективности $E_{\text{н}}$.

## 8.3. УЗЛООБРАЗОВАНИЕ ПАТС

### Общие положения

Выше уже указывалось, что решение вопросов соединения производственных автоматических телефонных станций между собой представляет важнейшую задачу построения сетей. Подчеркивалась связь между задачами районирования и узлообразования.

В данном разделе принимается, что число станций на сети, их расположение и емкости известны, т. е задача районирования решена, и требуется установить оптимальную схему соединения станций. Критерием оптимальности здесь является минимум затрат. Ограничением служит условие, что каждая станция должна быть соединена каким-либо маршрутом с любой другой станцией сети. Соединение может быть установлено непосредственно, без промежуточных станций или через 1,2 промежуточные станции, которые мы будем называть узлами. Не обязательно, чтобы исходящее и входящее сообщения между двумя станциями замыкались по одному и тому же маршруту.

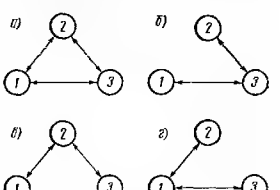


Рис. 8.8. Возможные схемы соединения трех станций между собой

Если на сети имеются только две станции, то задача узлообразования отсутствует — станции соединяются между собой единственно возможным образом и требуется установить только наиболее целесообразный способ организации межстанционной связи, пользуясь, например, данными, приведенными в разд. 8.1. Положение резко усложняется, когда число станций больше двух. Для иллюстрации на рис. 8.8 приведены возможные схемы соединения

трех станций между собой при условии, что входящее и исходящее сообщения замыкаются по одному и тому же маршруту. В этом случае общее количество возможных схем узлообразования $\sum_{k=0}^{3} C_3^k = 2^3 = 8$. Один из этих вариантов (первый) является схемой связи «каждый с каждым», три других — с узлом входяще-

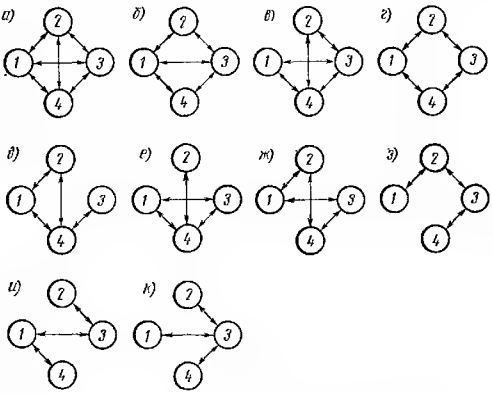



Рис. 8.9. Характерные структуры при соединении четырех станций между собой:
*а)* схема связи «каждый с каждой»; *б)* схемы связи с замыканием сообщения между 2 и 4-й станциями через 3-ю; *в)* схема связи с замыканием сообщения между 1 и 2-й станциями через 3 или 4-ю; *г)* схема связи с замыканием сообщения между 1 и 3-й, а также 2 и 4-й станциями соответственно через 2-ю (или 4-ю) или 1-ю (или 3-ю) станцию; *д)* схема связи с замыканием сообщения между 2 и 3-й, а также 1 и 3-й станциями через другие станции; е) схема связи с замыканием сообщения между 2 и 1-й и 2 и 3-й станциями через 4-ю станцию; *ж)* схема связи с замыканием сообщения между 2 и 3-й и 1 и 4-й станциями через другие станции; з) схема связи с узлами на 2 и 3-й станциях; *и)* схема связи с узлами на 1 и 3-й станциях; *к)* схема связи с узлом на 3-й станции

го (или исходящего) сообщения, когда связь двух станций между собой осуществляется через третью. Схемы узлообразования при $k=0$ и $k=1$ являются нерабочими, так как не обеспечивают связи всех станций сети между собой. Если на сети четыре станции, то общее количество возможных схем узлообразования

$\sum_{k=0}^{6} C_6^k = 2^6 = 64$. Из этих 64 вариантов только 38 являются рабочими, т. е. такими, в которых обеспечивается связь каждой станции с любой другой.

На рис. 8.9 приведены некоторые (наиболее характерные) структуры возможных схем узлообразования, когда на сети имеется четыре станции. На рис. 8.9*а* показана единственно возможная схема «каждая с каждой», на рис. 8.9*б* и *в* — две из 6 возможных схем связи, когда отсутствует одно какое-либо направление связи, на рис. 8.9*г, д, е, ж,* - четыре из 15 возможных схем, когда отсутствуют два направления связи между станциями, на рис. 8.9*з, и, к,* — три из 20 возможных схем, когда отсутствуют три направления связи. Отметим, что минимально возможное количество связей в схемах узлообразования равно $n-1$, где $n$ число станций на сети.

Принимая по-прежнему, что входящее и исходящее сообщения замыкаются по одному маршруту, при пяти ПАТС на сети имеем $\sum_{k=0}^{10} C_{10}^k = 2^{10} = 1024$, а при $n$ станциях

$$\sum_{k=0}^{\frac{n(n-1)}{2}} C_{\frac{n(n-1)}{2}} = 2^{\frac{n(n-1)}{2}}. \qquad (8.54)$$

Из ф-лы (8.54) следует, что количество вариантов схем узлообразования необычайно резко увеличивается с ростом числа станций на сети. Если же учесть, что входящее и исходящее сообщения могут не замыкаться по одному маршруту, то число этих вариантов достигнет величины $2^{n(n-1)}$. Перебор всех вариантов становится практически невозможным «вручную» при $n \geq 4$, а с помощью серийно выпускаемых ЭВМ — при $n=6-8$. Поэтому для решения задач узлообразования необходим иной метод, который не требовал бы перебора всех возможных вариантов. Например, если такой метод потребует рассмотрения не $2^{\frac{n(n-1)}{2}}$, а $\frac{n(n-1)}{2}$ вариантов, то объем вычислений уменьшается при $n=5$ в 102 раза, при $n=7$ в 100 000 раз, при $n=10$ в $10^{12}$ раз.

Нетрудно видеть, что вычислительные трудности являются основным тормозом на пути аналитического построения оптимальных схем узлообразования. Не подлежит сомнению, что любые попытки уменьшить количество рассматриваемых вариантов связаны с анализом функции затрат, связанных с этими вариантами. Отметим, что схемы на рис. 8.9*г, д, е* и *ж* имеют одинаковое количество участков сети (по 4 в каждой схеме), но схемы на рис. 8.9*г* и *ж* лучше других, так как при их применении любая пара станций может быть соединена друг с другом двумя непересекающимися маршрутами, что увеличивает живучесть сети.

### Исходные данные

Для решения задачи узлообразования необходимо знать расположение станций, задаваемое либо в координатах $(x, y)$, либо в виде таблицы, в которой на пересечении $i$ й строки с $j$-м столбцом проставляется расстояние $l_{ij}$ между станциями $i$ и $j$. Таблица симметрична, поскольку $l_{ij}=l_{ji}$; большую ее диагональ занимают нули, так как $l_{ii}=0$. Перейти от координат станций к расстоянию между ними легко, использовав известное соотношение аналитической геометрии.

$$l_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}. \tag{8.55}$$

Однако использование координат предполагает измерение всех расстояний по прямой, что не всегда может быть принято по условиям задачи. В этом смысле задание местоположения станций в форме таблицы предоставляет большой простор — расстояния могут быть измерены по конкретным трассам. Конечно, конкретные трассы тоже могут быть закоординированы, но введение в задачу достаточно сложным образом рассчитываемых данных, которые заранее известны, вряд ли может быть признано целесообразным.

При определении расстояний между станциями следует учесть, что как бы сложны не были трассы прокладки межстанционных кабелей, всегда имеет место аксиома треугольника: сумма двух сторон треугольника всегда больше одной его стороны. Иными словами,

$$l_{ik}+l_{kj}>l_{ij}, \tag{8.56}$$

где $i, k, j$ — индексы станций.

Аксиома треугольника входит в состав наиболее общего определения понятия расстояния [179] и неравенство (8.56) в дальнейшем предполагается всегда выполненным.

Кроме расстояний, для решения задачи узлообразования необходимо иметь данные о количестве линий (или каналов) между любыми станциями. Как известно, количество линий между двумя станциями определяется двумя параметрами — величиной пропускаемой нагрузки $y_{ij}$ и нормой потерь сообщения [1]. При постоянной величине потерь сообщения зависимость между числом линий (каналов) между станциями $v_{ij}$ и нагрузкой $y_{ij}$ достаточно хорошо аппроксимируется прямой:

$$v_{ij}=\alpha_1 y_{ij}+\alpha_0, \tag{8.57}$$

где $\alpha_1$ и $\alpha_0$ — коэффициенты линии регрессии.

На сетях ПАТС, как правило, потери сообщения на участках межстанционной связи принимаются равными 5‰. Как было показано в гл. 2, в этом случае $\alpha_1=1{,}58$ и $\alpha_0=2{,}96$, причем абсолютная ошибка между фактическим и корреляционным числом линий нигде не превышает 0,6 линии. С возрастанием величины $v_{ij}$ эта ошибка постоянно уменьшается.

[1] При постоянных величинах доступности и некоторых других характеристиках коммутационных устройств.

Предположим, что станция $k$ является узловой и на нее поступает входящий поток от $r$ станций, который затем следует в одном направлении. Нагрузки $y_r$, создаваемые каждой станцией, равны между собой. Тогда число входящих на узел $k$ линий равно $v_{вх}=r(\alpha_1 y_r+\alpha_0)$. Число исходящих из узла $k$ линий в указанном направлении можно определить как $v_{исх}=\alpha_1 r y_r+\alpha_0$. Отсюда следует, что $v_{исх}<v_{вх}$ на величину $(r-1)\alpha_0$. Этим проиллюстрировано известное положение о том, что при объединении мелких пучков линий в более крупные число линий в общем пучке уменьшается и тем значительнее, чем больше пучков объединено. Поэтому при проведении узлообразования следует исходить не из числа линий между станциями, которое, как мы только что убедились, зависит от схемы узлообразования, а из величины нагрузки между станциями. Нагрузка между станциями зависит от емкости всей сети, емкости станций и тяготения между ними. Эти характеристики предполагаются при решении задачи узлообразования известными.

Порядок расчета величины телефонной нагрузки и ее распределения между станциями определен техническими нормами проектирования Министерства связи СССР. Кратко напомним основные положения этих расчетов [89, 155 и др.].

Допустим, на сети имеется $n$ станций. Для каждой из них определяется величина телефонной нагрузки, поступающей в чни:

$$y_i = c_i t_i N_i,$$

где $c_i$ — среднее взвешенное число вызовов с одного телефонного аппарата в чнн для $i$-й ПАТС; $t_i$ — средняя продолжительность одного разговора для $i$-й ПАТС; $N_i$ — емкость ПАТС.

При определении величины $c_i$, $t_i$ учитывается структура состава абонентов, распределение вызовов по категориям (состоявшиеся разговоры, отказы из-за занятости, неответа абонента, неправильного набора номера и т. д.), характеристики процесса соединения (время слушания сигнала ответа станции, время набора номера и т. д.). Нагрузка всей сети определяется как $y=\sum_{i=1}^{n} y_i$.

Для каждой станции рассматривается отношение $y_i/y$, по величине которого по таблицам, содержащимся в [89, 155 и др.], находится процент исходящего сообщения $p_{исх\,i}$. Иными словами, для каждой станции определяется величина телефонной нагрузки, которая подлежит распределению между $n-1$ станциями сети;

$$y_{исх\,i} = p_{исх\,i} y_i.$$

Величина $y_i - p_{исх\,i} y_i$ представляет собой внутристанционное сообщение и нами не рассматривается. Телефонная нагрузка, поступающая от $i$-й станции к $j$-й, может быть определена по формуле

$$y_{ij} = f_{ij} \frac{y_{исх_i} y_{исх_j}}{\sum_{j=1}^{n} y_{исх_j} f_{ij}}, \qquad (8.58)$$

где $f_{ij}$ — коэффициент тяготения между станциями $i$ и $j$. Произведя расчеты по ф-ле (8.58) для всех станций $i$ и $j$, можно составить таблицу, на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца которой проставляются величины $y_{ij}$. Эта таблица не является симметричной, так как $y_{ij} \neq y_{ji}$. По большой диагонали таблицы стоят нули, так как $y_{ii}=0$ (внутристанционная нагрузка нас не интересует).

На основании изложенного можно сделать вывод, что необходимые для решения задачи узлообразования исходные данные могут быть сведены в табл. 8.8

Таблица 8.8

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УЗЛООБРАЗОВАНИЯ

| Станции | 1 | 2 | | $j$ | | $n$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | $l_{12}$; $y_{12}$ | | $l_{1j}$; $y_{1j}$ | | $l_{1n}$; $y_{1n}$ |
| 2 | $l_{21}$; $y_{21}$ | 0 | | $l_{2j}$; $y_{2j}$ | | $l_{2n}$; $y_{2n}$ |
| | | | | | | |
| $i$ | $l_{i1}$; $y_{i1}$ | $l_{i2}$; $y_{i2}$ | | $l_{ij}$; $y_{ij}$ | | $l_{in}$; $y_{in}$ |
| | | | | | | |
| $n$ | $l_{n}$; $y_{n1}$ | $l_{n2}$; $y_{n2}$ | | $l_{nj}$; $y_{nj}$ | | $o$ |

### Представление функции стоимости участка межстанционной связи

Выше уже указывалось, что критерием при решении задачи узлообразования является минимум затрат. Уточним, о каких затратах идет речь.

Алгоритм Беллмана — Шимбела позволяет получить совокупность оптимальных маршрутов по одному критерию — минимуму расстояний между пунктами (станциями). На практике формирование схем узлообразования определяется не только фактором расстояния, но и системой коммутации, количеством линий или каналов, которое должно быть организовано между станциями, а также способом осуществления межстанционной связи (низкочастотный кабель, высокочастотное уплотнение). Будем считать, что телефонная канализация на участках прокладки межстанционных кабелей уже имеется. При изменении схем узлообразования несколько изменяется и объем станционного (коммутационного) оборудования.

Однако в первом приближении изменением стоимости коммутационного оборудования можно пренебречь [134]. Также считаем, что выбор схемы узлообразования практически не влияет на величину эксплуатационных расходов.

Таким образом, ниже принято, что оптимальная схема узлообразования определяется только затратами на создание сети линейных сооружений. Стоимость строительства любого участка межстанционной связи

$$C_{ij} = C_{\kappa ij} + C_{0ij}, \tag{8.59}$$

где $C_{ij}$ — стоимость строительства участка межстанционной связи между станциями $i$ и $j$, тыс. руб.; $C_{\kappa ij}$ — стоимость прокладки кабеля между станциями $i$ и $j$, включая стоимость самого кабеля, тыс. руб; $C_{0i_j}$ — стоимость оборудования и его монтажа, тыс. руб.

Как было показано в разд. 8.1, $C_{\kappa ij}$ и $C_{0ij}$ могут быть представлены в виде:

$$C_{\kappa ij} = (a_0 + a_1 v_{ij} + a_2 v_{ij}^2) l_{ij}; \tag{8.60}$$

$$C_{0ij} = 2(b_0 + b_1 v_{ij} + b_2 v_{ij}^2) + c_{\text{пу}} n_{\text{у}ij} \tag{8.61}$$

или в виде:

$$C_{\kappa ij} = (a_0 + a_1 v_{ij}) l_{ij}; \tag{8.60'}$$

$$C_{0ij} = 2(b_0 + b_1 v_{ij}) + c_{\text{пу}} n_{\text{у}}, \tag{8.61'}$$

где $n_{\text{у}ij}$ — число промежуточных усилителей (низкочастотных или высокочастотных) на участке межстанционной связи; $c_{\text{пу}}$ — стоимость промежуточных усилительных пунктов, определенная при применении мостовых усилителей по ф-лам (8.11), (8.12) или (8.11′) и (8.12′), а при применении аппаратуры КРР — по ф-ле (8.15); $a_0$, $a_1$, $a_2$ — коэффициенты линий регрессии, приведенные в табл. 8.6; $b_0$, $b_1$, $b_2$ — коэффициенты линий регрессии, которые могут быть определены по ф-ле (8.14). При применении мостовых усилителей $b_0 = b_1 = b_2 = 0$.

Формулы (8.60), (8.61), (8.60′) и (8.61′) учитывают все виды затрат, рассмотренных в табл. 8.1 - 8.5 и поэтому имеют достаточно широкую область применения.

Стоимость участка межстанционной связи (8.60′) зависит линейно как от длины магистрали, так и от числа пар в кабеле. Такая билинейная зависимость весьма удобна при решении задач узлообразования, требующих громоздких вычислений. Кроме того, она обладает весьма характерной особенностью, заключающейся в том, что с увеличением $v_{ij}$ ошибка аппроксимации уменьшается. Поэтому применение ф-лы (8.60′) особенно эффективно при больших $v_{ij}$. Зависимость стоимости прокладки кабеля на участке $ij$ от его протяженности строго линейна до тех пор, пока используется один и тот же способ организации межстанционной связи. Иными словами, пока применяется кабель, например с диаметром жил 0,4 мм, зависимость вида (8.60′) справедлива. Как только потребу-

ется применение кабеля с диаметром жил 0,5 мм, эта формула должна использоваться с другими коэффициентами $a_0$, $a_1$ и $a_2$. Учитывая (8.57), рассматриваемую зависимость можно представить как

$$C_{кij} = (a_0 + a_1 a_0 + a_1 a_1 y_{ij}) l_{ij}.$$

Исходя из физического смысла ф-лы (8.60), коэффициенты $a_0$ и $a_1$ всегда положительны, поскольку они характеризуют постоянные и линейно возрастающие в зависимости от емкости пучка затраты, отнесенные на 1 км магистрали межстанционной связи. Наоборот, коэффициент $a_2$ должен быть отрицательным, так как в противном случае стоимость прокладки двух кабелей была бы дешевле стоимости прокладки одного кабеля суммарной емкости (см. гл. 7). Следовательно, $a_0>0$, $a_1>0$, $a_2<0$ и функция (8.60) имеет максимум при $v_{ij} = \frac{a_1}{a_2}$. Так как изменение стоимости прокладки кабеля в зависимости от емкости участка межстанционной связи может быть только положительным, то производная функция (8.60) должна быть больше нуля. Отсюда получаем очень важное соотношение, определяющее область применения ф-лы (8.60):

$$v_{ij} < \frac{a_1}{|a_2|}. \qquad (8.62)$$

Эта область, как следует из табл. 8.6, достаточно широка (до 1500 пар), и ф-лу (8.60) можно использовать для решения практических задач. С учетом (8.57) ф-ла (8.60) примет вид

$$C_{кij} = [a_0 + a_1 a_0 + a_2 a_0^2 + (a_1 a_1 + 2a_1 a_0 a_2) y_{ij} + a_2 a_0^2 y_{ij}^2] l_{ij}.$$

Итак, получены формулы, связывающие известные нам для каждого участка межстанционной связи величины $y_{ij}$ и $l_{ij}$ со стоимостью прокладки кабеля на данном участке (при известном способе организации межстанционной связи). Выбор же способа организации межстанционной связи может быть осуществлен при тех же исходных данных по алгоритму, изложенному в разделе 8.1. Можно использовать программу выбора на ЭВМ способа организации межстанционной связи или данные рис. 8.2 и 8.3. Поэтому ниже мы будем предполагать, что каждый раз решению задачи узлообразования предшествовал выбор способа организации межстанционной связи для каждого участка.

### Условие целесообразности узлообразования

Допустим, что на сети имеются всего три станции $j$, $i$, $k$, причем узел может быть размещен только на одной из станций. Станции $i$ и $j$ могут быть соединены между собой непосредственно или через узел — третью станцию $k$. Введение узла (станции $k$) целесообразно в том случае, если

$$\Phi_{ij} > \Phi_k, \qquad (8.63)$$

где $\Phi_{ij}$ — стоимость строительства сети при организации связи по принципу «каждая с каждой»; $\Phi_k$ — стоимость строительства сети при организации связи через узел $k$. Очевидно, что

$$\Phi_{ij} = C_{ik} + C_{ij} + C_{kj}; \tag{8.64}$$

$$\Phi_k = C'_{ik} + C'_{kj}, \tag{8.65}$$

где $C_{ik}$, $C_{ij}$, $C_{kj}$ — стоимость соответствующих линейных участков сети в том случае, когда три рассматриваемых станции связаны по принципу «каждая с каждой»; $C'_{ik}$, $C'_{kj}$ — стоимость соответствующих линейных участков сети в том случае, когда станции связаны через узел, размещенный на станции $k$.

Если стоимость прокладки кабелей на участках межстанционной связи определяется билинейной формулой зависимости (8.60), то

$$C_{ik} = \left(a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{ik}\right) l_{ik} + C_{0_{ik}};$$

$$C_{ij} = \left(a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{ij}\right) l_{ij} + C_{0_{ij}};$$

$$C_{kj} = \left(a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{kj}\right) l_{kj} + C_{0_{kj}};$$

$$C'_{ik} = \left[a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} (y_{ik} + y_{ij})\right] l_{ik} + C'_{0_{ik}};$$

$$C'_{kj} = \left[a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} (y_{kj} + y_{ij})\right] l_{kj} + C'_{0_{kj}},$$

где $x$ — в соответствии с ф-лой (7.65) — количество каналов, которое можно образовать по одной паре кабеля.

Преобразовав две последние формулы, получим:

$$C'_{ik} = C_{ik} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{ij} l_{ik} + \alpha_1 (2b_1 + b'_1 n_{y_{ik}}) y_{ij}; \tag{8.66}$$

$$C'_{kj} = C_{kj} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{ij} l_{kj} + \alpha_1 (2b_1 + b'_1 n_{y_{kj}}) y_{ij}, \tag{8.67}$$

где $n_{y_{ik}}$, $n_{y_{kj}}$ — число промежуточных усилителей соответственно на участках межстанционной связи $ik$ и $kj$; $b'_1$ — коэффициент в ф-лах (8.11′) и (8.12′), выражающих стоимость мостовых усилителей, а в ф-ле (8.15) — стоимость промежуточного усилительного пункта аппаратуры КРР.

На основе (8.65) имеем

$$\Phi_k = C_{ik} + C_{kj} + y_{ij} \left[\frac{a_1 \alpha_1}{x} (l_{ik} + l_{kj}) + \alpha_1 (4b_1 + b'_1 n_{y_{ik}} + b'_1 n_{y_{kj}})\right].$$

Схема связи с узлом будет целесообразна при выполнении условия (8.63). Отсюда

$$C_{ik} + C_{ij} + C_{kj} > C_{ik} + C_{kj} + y_{il}\left[\frac{a_1 \alpha_1}{x}(l_{ik} + l_{kj}) + \right.$$

$$\left. + \alpha_1 (4b_1 + b_1' n_{y_{ik}} + b_1' n_{y_{kj}})\right]$$

и

$$C_{ij} > y_{ij}\left[\frac{a_1 \alpha_1}{x}(l_{ik} + l_{kj}) + \alpha_1 (4b_1 + b_1' n_{y_{ik}} + b_1' n_{y_{kj}})\right]. \quad (8.68)$$

Раскроем величину $C_{ij}$:

$$C_{ij} = \left(a_0 + \frac{a_1 \alpha_0}{x} + \frac{a_1 \alpha_1}{x} y_{ij}\right) l_{ij} + (2b_1 + b_1' n_{y_{ij}}) \times$$

$$\times (\alpha_1 y_{ij} + \alpha_0) + 2b_0 + b_1' n_{y_{ij}},$$

где $b_0'$ — свободный член в выражении для стоимости промежуточных усилителей. Подставим это выражение в (8.68) и после элементарных преобразований получим условие выгодности размещения узла $k$ при связи станций $i$ и $j$:

$$l_{ik} + l_{kj} - l_{ij} < \frac{(ax + a_1 \alpha_0) l_{ij} + [\alpha_0 (2b_1 + b_1' n_{y_{ij}}) + \rightarrow}{a_1 \alpha_1 y_{ij}}$$

$$\rightarrow + 2b_0 + b_0' n_{y_{ij}}] x - \frac{x[2b_1 + b_1'(n_{y_{ij}} - n_{y_{ik}} - n_{y_{kj}})]}{a_1}.$$

Обозначив $\Delta l_k = l_{ik} + l_{kj} - l_{ij}$ и $\Delta n_k = n_{yik} + n_{ykj} - n_{yij}$ окончательно получим

$$\Delta l_k < \frac{(a_0 x + a_1 \alpha_0) l_{ij} + \alpha_0 x (2b_1 + b_1' n_{y_{ij}}) + (2b_0 + b_0' n_{y_{ij}}) x}{a_1 \alpha_1 y_{ij}} -$$

$$- \frac{(2b_1 + b_1' \Delta n_k) x}{a_1}. \quad (8.69)$$

Таким образом, если разность маршрута через узел $k$ и прямого маршрута между станциями $i$ и $j$ меньше, чем выражение, стоящее в правой части (8.69), то размещение узла на станции $k$ целесообразно. Значения коэффициентов $b_0$, $b_1$, $b_0'$ и $b_1'$, полученных по данным разд. 8.1, приведены в табл. 8.9.

Из (8.69) следует, что целесообразность введения узла при связи станций $i$ и $j$ зависит от расстояния и нагрузки между этими станциями, способа организации межстанционной связи и потерь сообщения. Целесообразность организации узла возрастает с увеличением расстояния между станциями, уменьшением нагрузки, увеличением потерь сообщения, удешевлением стоимости организации межстанционной связи.

ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ $b_в$, $b_1$, $b'_0$ И $b'_1$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСТАНЦИОННОЙ СВЯЗИ

| Способ организации межстанционной связи | Величины коэффициентов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $b_в$, тыс. руб. | $b_1$, тыс. руб./канал (пару) | $b'_0$, тыс. руб. | $b'_1$, тыс. руб./канал (пару) |
| Высокочастотное уплотнение | 0,983 | 0,235 | 0,280 | 0,0285 |
| Мостовые усилители с числом линий меньше 240 | 0 | 0 | 0,380 | 0,075 |
| То же, с числом линий больше 270 | 0 | 0 | 0,338 | 0,076 |

В табл. 8.10 приведены выражения для правой части неравенства (8.69), преобразованные для разных способов организации межстанционной связи по данным табл. 8.6 и 8.9 (при потерях 5‰).

Таблица 8.10

УСЛОВИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ УЗЛА НА СТАНЦИИ $k$ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСТАНЦИОННОЙ СВЯЗИ (ПОТЕРИ 5‰)

| Диаметр жил кабеля | Правая часть неравенства (8.69) | |
|---|---|---|
| | без промежуточных усилителей | с промежуточными усилителями |
| 0,4 | $28{,}3\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}}$ | $28{,}3\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}} + 47\,\frac{n_{y_{ij}}}{y_{ij}} - 9{,}55\,\Delta n_k$ |
| 0,5 | $27{,}1\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}}$ | $27{,}1\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}} + 42{,}5\,\frac{n_{y_{ij}}}{y_{ij}} - 8{,}56\,\Delta n_k$ |
| 0,7 | $17{,}3\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}}$ | $17{,}3\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}} + 24{,}8\,\frac{n_{y_{ij}}}{y_{ij}} - 5{,}1\,\Delta n_k$ |
| 1,2[1] (при $x$=30) | $\frac{21{,}4\,l_{ij} + 70{,}8}{y_{ij}} - 16{,}1$ | $\frac{21{,}4\,l_{ij} + 7{,}9\,n_{y_{ij}} + 70{,}8}{y_{ij}} - 16{,}1 - \Delta n_k$ |

[1]) При применении вч уплотнения левая часть неравенства (8.69) равна $\frac{\Delta l_k}{4{,}43}$.

Если мостовые усилители и аппаратура высокочастотного уплотнения не применяются, условие (8.69) принимает вид

$$\Delta l_k < \frac{a_0 + a_1 \alpha_0}{a_1 \alpha_1}\,\frac{l_{ij}}{y_{ij}}. \qquad (8.70)$$

Условие (8.69) получено при предположении, что мы не изменяем способ организации межстанционной связи, размещая узел на станции $k$ или соединяя станции $i$ и $j$ по принципу «каждая с каждой». Если же это предположение не подтверждается, то ф-лы (8.66) и (8.67) должны быть переписаны с учетом применения других способов организации межстанционной связи на участках $ik$ и $kj$. При этом оказывается, что условие целесообразности размещения узла на станции $k$ зависит и от величин $y_{ik}$ и $y_{kj}$.

Допустим, что при связи станций $i$, $j$ и $k$ между собой по принципу «каждая с каждой» применяется один способ организации межстанционной связи, а при связи через узел $k$ — другой (будем обозначать коэффициенты функции стоимости затрат по этому способу через $a_0'$ и $a_1'$). Если аппаратура высокочастотного уплотнения и мостовые усилители не используются, условие (8.70) будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta l < \frac{(2a_0 - a_0') + (2a_1 - a_1')\alpha_0}{(a_0' - a_0) + \alpha_0(a_1' - a_1) + \alpha_1 a_1' y_{ij}} l_{ij} - \frac{y_{ik} l_{ik} + y_{kj} l_{kj} + y_{ij} l_{ij}}{\frac{1}{4}(a_0' - a_0) + a_1' y_{ij}} - \frac{\alpha_0}{(a_1' - a_1)} - \frac{\alpha_0}{\alpha_1}. \quad (8.71)$$

При $a_0 = a_0'$ и $a_1 = a_1'$ неравенство (8.71) превращается в (8.70). Аналогично могут быть получены и условия целесообразности введения узла при других сочетаниях способов организации межстанционной связи.

При числе станций на сети $n > 3$ условие (8.69) сохраняет свое значение, так как оно не зависит от величин телефонного сообщения между какими-либо иными станциями, кроме станций $i$ и $j$. Следовательно, если условие (8.69) выполнено хотя бы для одного $k$, то связь между станциями $i$ и $j$ должна быть организована через узел, хотя этим узлом может быть и какая-либо другая станция (не обязательно $k$). Обратное утверждение не имеет места: если условие (8.69) не выполнено для какой-либо $k$, то это еще не означает, что станции $i$ и $j$ должны быть соединены друг с другом непосредственно. Сколько бы не было станций на сети, можно добавить одну такую, на которой целесообразно разместить узел для связи станции $i$ и $j$. Однако, если количество станций на сети строго фиксировано и ни для одной из ($n$—2) станций условие (8.69) не выполнено, то станции $i$ и $j$ должны быть соединены друг с другом без узла.

Рассмотрим, как видоизменится условие (8.70), если в качестве выражения стоимости участка межстанционной связи будет

использована квадратичная зависимость. Легко убедиться, что в этом случае

$$\Phi_k = C_{ik} + C_{kj} + (a_1\alpha_1 + 2a_1\alpha_0 a_2)\, y_{ij}(l_{ik} + l_{kj}) + a_2\alpha_0^2[\, y_{ij}^2 (l_{ik} + l_{kj}) + 2y_{ij}(y_{ik}l_{ik} + y_{kj}l_{kj})]. \qquad (8.72)$$

Тогда на основе неравенства (8.63) имеем

$$(a_0 + a_1\alpha_0 + a_2\alpha_0^2)\, l_{ij} + (a_1\alpha_1 + 2a_1\alpha_0 a_2)\, y_{ij} l_{ij} + a_2\alpha_0^2 y_{ij}^2\, l_{ij} > > (a_1\alpha_1 + 2a_1\alpha_0 a_2)\, y_{ij}(l_{ik} + l_{kj}) + a_2\alpha_0^2[\, y_{ij}^2 (l_{ik} + l_{kj}) + 2y_{ij}(y_{ik}l_{ik} + y_{kj}l_{kj})].$$

После нескольких преобразований приходим к неравенству

$$\Delta l_k < \frac{(a_0 + a_1\alpha_0 + a_2\alpha_0^2)\dfrac{l_{ij}}{y_{ij}} - 2a_2\alpha_0^2(y_{ik}l_{ik} + y_{kj}l_{kj})}{a_1\alpha_1 + a_2(2\alpha_0\alpha_1 + \alpha_0^2 y_{ij})}. \qquad (8.73)$$

При $a_2=0$ неравенство (8.73) превращается в (8.70). Напомним, что при использовании квадратической формы зависимости стоимости участка межстанционной связи коэффициент $a_2<0$. На основании изложенного можно подвести некоторые итоги. Зная способ организации межстанционной связи, который определяет величины используемых коэффициентов в условии (8.69), мы легко для каждой пары станций $i$ и $j$ можем установить, нужно ли при связи между ними вводить узел или их целесообразно соединить непосредственно по принципу «каждая с каждой».

При линейном представлении функции стоимости участка межстанционной связи решение о целесообразности размещения узла принимается только на основании данных, характеризующих сами станции, $y_{ij}$ и $l_{ij}$, так как потери сообщения и способ организации межстанционной связи заданы по условию.

Если стоимость участка межстанционной связи представляется в квадратичной форме, то целесообразность размещения узла зависит не только от способа организации межстанционной связи, потерь сообщения, нагрузки и расстояния между станциями, но и от величины $y_{ik}l_{ik}+y_{kj}l_{kj}$, которая является функцией выбранного маршрута. Однако от неравенства (8.73), также как и от неравенств (8.69), (8.70), (8.72), нельзя получить ответа на вопрос, какая станция должна быть узловой. Эти неравенства показывают, целесообразно ли вводить узел вообще или нужно станции соединить друг с другом при данных конкретных условиях. Выбор же узловой станции, если доказано, что введение узла целесообразно, производится, исходя из других соображений.

## Выбор узловой станции

Предположим, что станции $i$ и $j$ могут быть соединены между собой либо через станцию $k$, либо через станцию $m$. Выразим соответствующие стоимости строительства сети $\Phi_k$ и $\Phi_m$:

$$\Phi_k = (a_0 + a_1 a_0 + a_1 a_1 y_{ij})(l_{ik} + l_{kj}) + a_1 a_1 (y_{ik} l_{ik} + y_{kj} l_{kj}) +$$
$$+ 2a_1 b_1 (y_{ik} + y_{kj} + 2y_{ij}) + b'_1 a_1 [y_{ij}(n_{y_{ik}} + n_{y_{kj}}) + n_{y_{ik}} y_{ik} + n_{y_{kj}} y_{kj}] +$$
$$+ (a_0 b'_1 + b'_0)(n_{y_{ik}} + n_{y_{kj}}) + 4b_0 + 2b_1 a_0;$$

$$\Phi_m = (a_0 + a_1 a_0 + a_1 a_1 y_{ij})(l_{im} + l_{mj}) + a_1 a_1 (y_{im} l_{im} + y_{mj} l_{mj}) +$$
$$+ 2a_1 b_1 (y_{im} + y_{mj} + 2y_{ij}) + b'_1 a_1 [y_{ij}(n_{y_{im}} + n_{y_{mj}}) + n_{y_{im}} y_{im} +$$
$$+ n_{y_{mj}} y_{mj}] + (a_0 b'_1 + b'_0)(n_{y_{im}} + n_{y_{mj}}) + 4b_0 + 2b_1 a_0.$$

Чтобы размещение узла на станции $k$ было бы целесообразнее, чем на станции $m$, необходимо, чтобы

$$\Phi_m > \Phi_k. \tag{8.74}$$

Из (8.74) следует, что узел следует разместить на такой станции, которая обеспечивает:

1) при использовании на участках межстанционной связи только низкочастотных кабелей

$$\min L_k; \tag{8.75}$$

2) при применении мостовых усилителей

$$\min (L_k + S_y); \tag{8.76}$$

3) при использовании аппаратуры высокочастотного уплотнения

$$\min (L_k + S_y + S_{вч}), \tag{8.77}$$

где обозначено

$$L_k = \left[a_0 + \frac{a_1}{x}(a_0 + a_1 y_{ij})\right](l_{ik} + l_{kj}) + \frac{a_1}{x} a_1 (y_{ik} l_{ik} + y_{kj} l_{kj}); \tag{8.78}$$

$$S_y = [b'_0 + b'_1 (a_0 + a_1 y_{ij})](n_{y_{ik}} + n_{y_{kj}}) + b'_1 a_1 (y_{ik} n_{y_{ik}} + y_{kj} n_{y_{kj}}); \tag{8.79}$$

$$S_{вч} = 2a_1 b_1 (y_{ik} + y_{kj}); \tag{8.80}$$

Из приведенных формул следует, что местоположение узла зависит от расстояний $l_{ik}$ и $l_{kj}$ (но не зависит от $l_{ij}$), нагрузок $y_{ik}$, $y_{kj}$ и $y_{ij}$, потерь сообщения и способа организации межстанционной связи. При заданной величине потерь сообщения для каждого способа межстанционной связи выражения (8.78)—(8.80) могут быть численно выражены как функции расстояний $l_{ik}$ и $l_{kj}$ и нагрузок $y_{ik}$, $y_{kj}$ и $y_{ij}$, наподобие того, как это было сделано в табл. 8.9. Полученные соотношения позволяют осуществить синтез схемы узлообразования для сети, состоящей из любого числа станций $n$. В до-

статочно общем виде алгоритм узлообразования может быть представлен в следующем виде:

1. Вводится таблица исходных данных — $l_{ij}$, $y_{ij}$. Идем к 2.

2. Для каждой пары станций $i$ и $j$ определяется способ организации межстанционной связи. Идем к 3.

3. Выбираем наугад одну станцию $i$. Идем к 4.

4. Для всех $j$ проверяем соответствие условию (8.69). Если условие (8.69) выполнено, идем к 5, если не выполнено, то к 7.

5. Станции $i$ и $j$ должны быть соединены через узел. Для всех $k(k\neq i;\ k\neq j)$ подсчитываем $L_k$, $L_k+S_y$ или $L_k+S_y+S_{вч}$ (в зависимости от способа организации межстанционной связи). Идем к 6.

6. Определяем $\min L_k$, $\min(L_k+S_y)$ или $\min(L_k+S_y+S_{вч})$ в зависимости от способа организации межстанционной связи. Устанавливаем $k$. Идем к 7.

7. Выдаем на печать выбранные участки межстанционной связи. Запоминаем эти участки, суммируем нагрузки. В дальнейших расчетах данные участки принимаются как существующие. Идем к 8.

8. Все станции перебрали? Да — идем к 9; нет — идем к 3.

9. Останов.

Данный алгоритм требует перебора $n$ $(n-1)$ вариантов. Если считать, что связи от $i$ к $j$ и от $j$ к $i$ организуются одинаково, то число рассматриваемых вариантов сокращается вдвое. Если снять принятое в алгоритме ограничение, что станции могут быть соединены друг с другом не более чем через одну промежуточную станцию, то число рассматриваемых вариантов не увеличивается, но возрастает объем вычислений по каждому варианту (операторы 5 и 6). Получить соответствующие этому случаю неравенства не представляет особых затруднений.

Также не представляет труда ввести в оператор 7 алгоритма условие целесообразности узлообразования, когда на требуемом участке уже предусмотрена прокладка кабеля и необходимо увеличить его пропускную способность. В этом случае при расчете соответствующих величин $L_k$ и $S_y$ следует положить $a_0=b_0'=0$.

Приведенный алгоритм не может гарантировать получения совершенно точно оптимального варианта, поскольку результат может оказаться зависящим от того, в каком порядке осуществляется перебор станций. Однако изменение порядка перебора станций оказывает на конечный результат не решающее, а уточняющее значение. Поэтому приведенный алгоритм дает решение, если не точно оптимальное, то очень к нему близкое.

Полученные выше соотношения могут оказаться полезными и при применении для синтеза схемы узлообразования метода динамического программирования.

Нетрудно видеть, что наиболее общий алгоритм синтеза схем узлообразования, который бы позволял не использовать ограничений, достаточно сложен, хотя и возможен. В практических усло-

виях всегда можно принять те или иные допущения, которые, не влияя решающим образом на точность результата, позволяют значительно упростить вычисления. Наиболее простые алгоритмы получаются при билинейной форме зависимости стоимости участка межстанционной связи, когда связь двух станций между собой может осуществляться не более чем через одну промежуточную станцию, причем на сети используется только один способ межстанционной связи, связанный с применением низкочастотных кабелей. В этом случае условие целесообразности узлообразования может быть представлено в виде

$$\Delta l_k < \frac{a_0}{a_1} \frac{l_{ij}}{v_{ij}} . \qquad (8.81)$$

### Некоторые вопросы построения межстанционной кабельной сети

При решении вопросов узлообразования очень часто оказывается, что на одном и том же участке межстанционной связи необходимо проложить кабели с разным диаметром жил или низкочастотный кабель совместно с кабелем, уплотняемым аппаратурой высокочастотного уплотнения и т. д. Пользуясь полученными выше соотношениями, легко определить условия целесообразности объединения различных способов организации межстанционной связи. При этом важно подчеркнуть, что такое объединение производится на базе более дорогого способа организации межстанционной связи, так как в противном случае не будет обеспечено выполнение требуемой нормы затухания.

Допустим, что на участке межстанционной связи протяженностью $l_{ij}$ необходимо проложить один кабель с числом пар $v_1$, стоимость которого $C_1=(a_0+a_1v_1)l_{ij}$, и второй кабель с числом пар $v_2$, стоимость которого $C_2=(a'_0+a'_1v_2)l_{ij}$. Причем известно, что $a'_0>a_0$ и $a'_1>a_1$, т. е. второй кабель соответствует более дорогому способу организации межстанционной связи, обеспечивающему на участке $ij$ меньшую величину затухания. Первый кабель может иметь диаметр жил 0,4 или 0,5 мм, второй - 0,5 или 0,7 мм. Задача состоит в том, чтобы определить: целесообразнее проложить два кабеля с разным диаметром жил или один кабель с большим диаметром жил и общей емкостью.

Условие целесообразности прокладки объединенного кабеля может быть записано в виде

$$C_1 + C_2 > [a'_0 + a'_1(v_1 + v_2)]\, l_{ij}. \qquad (8.82)$$

Отсюда следует, что

$$v_1 < \frac{a_0}{a'_1 - a_1} . \qquad (8.83)$$

Если емкость кабеля с меньшим диаметром жил будет больше правой части неравенства (8.83), то необходимо прокладывать два самостоятельных кабеля. Если условие (8.83) выполняется, то должен быть проложен один общий кабель.

Из табл. 8.6 легко определить, что должен быть проложен один кабель с диаметром жил 0,7 мм, если емкость параллельного ему кабеля с диаметром жил 0,4 и 0,5 мм меньше 50×2; кабель с диаметром жил 0,5 мм прокладывается в тех случаях, когда емкость параллельного ему кабеля с диаметром жил 0,4 мм меньше 300×2.

Если на рассматриваемом участке требуется проложить не два, а несколько различных кабелей, то следует учитывать, что:

а) кабели с одним диаметром жил безусловно объединяются (см. гл. 7);

б) кабель, имеющий наибольший диаметр жил, должен быть проложен в любом случае, поэтому сравнения с этим кабелем могут производиться по ф-ле (8.84) для каждого параллельного кабеля;

в) если окажется нецелесообразным объединять кабели на базе наиболее дорогого, то сравнения должны быть продолжены для кабеля, имеющего несколько меньший диаметр жил и т. д.

Все вышеизложенное относится и к случаю, когда применяются мостовые усилители: вопрос об объединении кабелей рассматривается независимо от усилителей и только по окончании расчета принимается решение о том, на каких парах они должны быть установлены. Например, если необходимо проложить кабель с диаметром жил 0,5 мм емкостью $v_1$ и параллельно ему кабель с тем же диаметром жил емкостью $v_2$, но с использованием усилителей, то прокладывается один кабель емкостью $v_1+v_2$ и с диаметром жил 0,5 мм, причем $v_2$ пар этого кабеля оборудуются усилителями.

Совершенно другую картину имеем при применении высокочастотного уплотнения, так как в этом случае физически невозможно в одном кабеле совместить два различных способа организации межстанционной связи. Если на рассматриваемом участке необходимо параллельно уплотняемой магистрали проложить низкочастотный кабель емкостью $v_1$, то условие целесообразности организации $v_1$ каналов вместо прокладки кабеля может быть записано в виде

$$v_1 < \frac{a_0}{a_1' - a_1 + \dfrac{2b_1 + b_1' n_{y_{ij}}}{l_{ij}}}, \qquad (8.84)$$

где $a_0$ и $a_1$ относятся к низкочастотному кабелю, а $a'_1$ — к высокочастотному: коэффициенты $b_1$ и $b'_1$ сохраняют свое прежнее значение.

Если на рассматриваемом участке предусматривается и высокочастотное уплотнение и прокладка низкочастотного кабеля с мостовыми усилителями, то условие целесообразности применения ис-

ключительно высокочастотного уплотнения может быть выражено так:

$$v_1 < \frac{a_0 + \frac{b'_0 n_{y_{ij}}}{l_{ij}}}{a'_1 - a_1 + \frac{2b_1 + b'_{1вч} n_{y_{ij}} - b'_1 n_{y_{ij}}}{l_{ij}}}, \qquad (8.85)$$

где $a_0$, $b'_0$, $b'_1$ и $n_{y_{ij}}$ относятся к варианту использования мостовых усилителей, а $a'_1$, $b_1$, $b'_{1вч}$, $n_{y_{ij}вч}$ — высокочастотного уплотнения.

## 8.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ РАДИОТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ «АЛТАЙ»

Необходимость применения средств радиосвязи в составе систем производственной связи диктуется конкретными условиями данного производства наличием соответствующего парка подвижных объектов, требующих оперативного управления, удаленных участков и т. д. Однако если такая необходимость установлена, то возникает вопрос о том, каким образом должна быть организована радиосвязь. Выше уже указывалось (см. гл. 3), что существуют две системы радиотелефонной связи — коммутируемая (обычно на базе аппаратуры типа «Алтай») и некоммутируемая (прямая). В качестве средств прямой радиосвязи используются различные типы радиостанций (см. табл. 5.14). Ниже для простоты изложения принимается, что система некоммутируемой радиосвязи организуется с помощью радиостанций только одного типа («Гранит»).

Применение системы радиотелефонной связи «Алтай» оправдывается только в составе больших систем производственной связи. Это объясняется высокой первоначальной стоимостью оборудования и большими затратами на обслуживание центральной и абонентских станций. Экономически целесообразность использования системы радиотелефонной связи «Алтай» (равно как и других автоматизированных систем радиотелефонной связи) может быть определена при сравнении требующихся при этом приведенных затрат с аналогичными затратами при организации сетей некоммутируемой радиотелефонной связи. Необходимо отметить, что сравниваемые схемы организации радиосвязи должны быть поставлены в равные условия, так как они обладают различными коммутационными, техническими и эксплуатационными характеристиками.

В системе радиотелефонной связи «Алтай» коллективно используется 8 дуплексных радиоканалов, в которые включаются $n_1$ абонентских станций, имеющих возможность соединиться как между собой, так и с абонентами телефонной сети и с диспетчерскими

пунктами. В каждой сети некоммутируемой радиотелефонной связи задействуется один дуплексный или симплексный радиоканал, которым могут пользоваться $n_2$ абонентов ($n_2 \ll n_1$), причем связь здесь практически осуществляется только между собой и с диспетчерским пунктом, где устанавливается центральная станция.

Сравниваемые схемы организации радиосвязи представлены на рис. 8.10. Рассмотрим различия этих схем, которые должны быть установлены для возможности проведения экономического расчета.

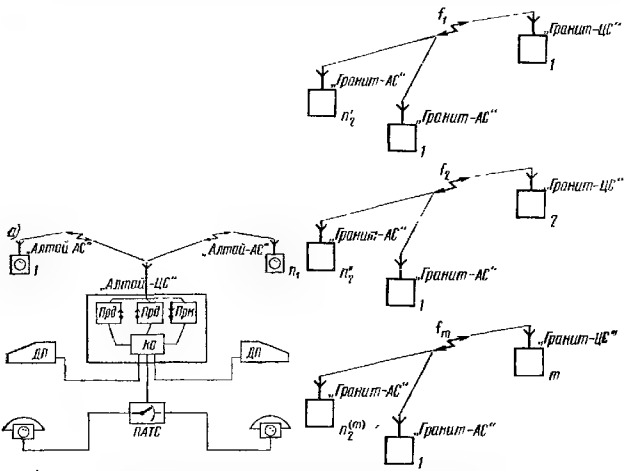



Рис. 8.10. Схемы организации радиосвязи:
*а)* с применением системы «Алтай» (*КО* — коммутационное оборудование; *П* — передатчики; *ПРМ* — приемники; *ДП* — выносные диспетчерские пункты); *б)* с использованием сетей некоммутируемой радиосвязи

Известно, что в 8 коллективных каналов при заданном качестве связи можно включить большее количество абонентских пунктов, чем в 8 каналов, используемых раздельно. Поэтому при непременном условии — равенстве величин нагрузки и качества их обслуживания — сравнимость этих систем может быть достигнута двумя путями: либо при равенстве количества абонентских пунктов, но тогда не будет обеспечено одинаковое количество каналов, либо при постоянном количестве каналов, но тогда не будет равенства колнчества пунктов. Рассмотрим обе эти возможности. Учтем, что в обоих случаях радиостанции дуплексные, обеспечивающие

одинаковые дальность и достоверность связи. Если по местным условиям допущения о равенстве радиусов действия радиосвязи принять нельзя, то должны быть применены соответствующие поправочные коэффициенты.

В случае, когда принимается равенство абонентских пунктов, в качестве исходного имеем следующее уравнение:

$$n_1 = mn_2, \tag{8.86}$$

где $m$ — количество радиосетей некоммутируемой радиотелефонной связи, которые обеспечили бы пропускание одинаковой с системой коммутируемой радиотелефонной нагрузки при заданном качестве связи; $n_1$ — требуемое количество абонентских пунктов системы радиотелефонной связи; $n_2$ — количество абонентских пунктов, которые должны быть включены на одну частоту сети некоммутируемой радиосвязи при заданном качестве связи.

Из (8.86) непосредственно следует

$$m = n_1/n_2. \tag{8.87}$$

Составим функции приведенных затрат в этом случае. Для системы коммутируемой радиотелефонной связи

$$П_1 = E_н C_1 + Э_1 = E_н (C_{ЦС1} + n_1 C_{АС1} + n_d C_{ДП}) + Э_{ЦС1} + n_1 Э_{АС1}, \tag{8.88}$$

где $C_{ЦС1}$ — стоимость центральной станции системы коммутируемой радиотелефонной связи. Применительно к одному стволу системы «Алтай» эту величину можно принять равной 164 тыс. руб., в том числе, стоимость оборудования – 156 тыс. руб. и строительно-монтажные работы – 8 тыс. руб.; $C_{АС1}$ — стоимость абонентской станции системы коммутируемой радиотелефонной связи. Для системы «Алтай» эта величина равна сумме стоимости оборудования (1980 руб. при действующих ценах) и стоимости монтажных работ по существующим расценкам); $C_{ДП}$ — стоимость оборудования (1840 руб.) и монтажа (620 руб.) ведомственного диспетчерского пункта системы коммутируемой радиотелефонной связи; $n_d$ — количество ведомственных диспетчерских пунктов (в системе «Алтай» $n_d \leqslant 18$); $Э_{ЦС1}$ — годовые эксплуатационные затраты на обслуживание ствола системы коммутируемой радиотелефонной связи с учетом затрат на аренду линейных сооружений для подключения диспетчерских пунктов и соединительных линий с АТС. Эта величина в зависимости от местных условий может колебаться в весьма широких пределах; $Э_{АС1}$ — годовые эксплуатационные затраты на обслуживание одной абонентской станции системы; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности.

Для сетей некоммутируемой радиотелефонной связи

$$П_2 = E_н C_2 + Э_2 = E_н (mC_{ЦС2} + n_1 C_{АС2}) + mЭ_{ЦС2} + n_1 Э_{АС1}, \tag{8.89}$$

где $C_{ЦС2}$ — стоимость одной центральной станции; при действующих ценах эта величина может быть принята равной примерно 10 тыс. руб., в том числе, стоимость оборудования дуплексной

радиостанции — 8,5 тыс. руб.; $C_{АС2}$ — средневзвешенная стоимость абонентской дуплексной станции, определяемая как

$$C_{АС2} = \frac{n'_2 C'_{АС2} + n''_2 C''_{АС2}}{n_2}, \qquad (8.90)$$

где $n'_2$ и $n''_2$ — количество абонентских станций соответственно в мобильном и стационарном вариантах, а $C'_{АС2}$ и $C''_{АС2}$ — их стоимость (оборудование мобильной станции 2РТМ-Л2-4М — 1169 руб.; стационарной — 27РТС-П2-4М — 1477 руб.; стоимость монтажных работ — по действующим прейскурантам); $Э_{ЦС2}$ $Э_{АС2}$ — годовые эксплуатационные расходы на обслуживание соответственно одной центральной и одной абонентской станций.

Применение системы коммутируемой радиотелефонной связи будет экономически целесообразно, если

$$П_1 < П_2. \qquad (8.91)$$

Рассмотрим использование ф-лы (8.91) на примере. Допустим, одна абонентская радиостанция в час наибольшей нагрузки делает 1 вызов при средней продолжительности разговора 1,0 мин. Необходимо, чтобы оперативность связи была не хуже $Q=0,9$. При таких условиях по рис. 4.30 определяем $n_2=20$, а экстраполяция (см. рис. 4.26) при тех же данных дает $n_1=224$. Следовательно, в соответствии с (8.87) $m \approx 12$. Примем стоимость монтажа абонентских станций равной 250 руб., средневзвешенную цену одной радиостанции прямой связи — 1323 руб., количество диспетчерских пунктов системы коммутируемой радиотелефонной связи $n_д=12$. Нормативный коэффициент эффективности, как и прежде, $E_н=0,15$. В соответствии с гл. 5 и 7 величины годовых эксплуатационных расходов при среднегодовой зарплате одного работающего $\varphi=1200$ руб. будут равны:

$$Э_{ЦС2} = 0,267 \cdot 1,2 = 0,32 \text{ тыс. руб.};$$

$$Э_{АС2} = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ тыс. руб.}$$

Центральную станцию системы «Алтай» обслуживает 10 человек. Поэтому

$$Э_{ЦС1} = 10\varphi/0,344 = 10 \cdot 1,2/0,344 = 35 \text{ тыс. руб.}$$

Можно принять $Э_{АС1}=0,326$ тыс. руб. Подставляя все исходные данные в ф-лы (8.88) и (8.89), получим:

$$П_1 = 0,15\,[164 + 224\,(1,98 + 0,25) + 12\,(1,84 + 0,62)] + \\ + 35 + 224 \cdot 0,326 = 208 \text{ тыс. руб.}$$

$$П_2 = 0,15\,[22 \cdot 10 \cdot 224\,(1,323 + 0,25)] + 12 \cdot 0,32 + 224 \cdot 0,6 = 209 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, по величине приведенных затрат оба варианта в данных условиях оказываются примерно равноценными. Однако предпочтение должно быть отдано системе коммутируемой радиосвязи, так как она требует меньшего количества радиочастот и представляет абонентам некоторые дополнительные возможности, не отраженные в расчете

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

# *Вопросы эксплуатации систем производственной связи*

## 9.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные системы производственной связи для своего создания требуют комплексного решения вопроса планирования, проектирования, финансирования, строительства и эксплуатации. В свою очередь, правильная организация эксплуатации систем производственной связи представляет собой сложную комплексную задачу.

В гл. 5 была подробно рассмотрена структура эксплуатационных расходов. Минимум расходов достигается в том случае, если в составе систем производственной связи будет применена высоконадежная аппаратура и если обслуживаться она будет квалифицированными работниками. Задачей службы связи является обеспечение бесперебойной работы всех средств передачи информации. Минимум эксплуатационных расходов и соответствующий уровень функционирования — это два критерия, по которым может осуществляться синтез систем обслуживания. Однако в условиях производства наибольшее значение имеет второй критерий, поскольку он характеризует работоспособность подсистемы передачи информации в рамках системы управления, повышение эффективности которой должно оправдывать затраты на составляющие ее подсистемы (в том числе, передачи информации).

Поскольку технические средства связи являются восстанавливаемыми элементами, система обслуживания этих средств характеризуется двумя критериями коэффициентом готовности и коэффициентом простоев. Как будет показано ниже, в ряде случаев удобнее использовать коэффициент простоев, который несколько удобнее характеризует выполнение службой эксплуатации своих функций, а в некоторых случаях — коэффициент готовности.

Коэффициент готовности и коэффициент простоев это численные показатели уровня функционирования системы связи, характеризующего эффективность службы эксплуатации. Важно отметить, что целый ряд задач практически можно решить только

с использованием этого критерия, а именно задачи, связанные с обеспечением бесперебойной передачи информации. Применение в этих случаях чисто экономических расчетов часто не позволяет получить нужного результата, поскольку минимум эксплуатационных расходов может быть меньше того уровня организации эксплуатации, который соответствует заданному уровню функционирования средств связи. Однако при решении некоторых специфических задач (например, оптимальной замены элементов при профилактике) экономические методы оказываются приемлемыми.

Все вышесказанное обусловливает широкое использование методов теории надежности и теории массового обслуживания для решения задач организации эксплуатации систем производственной связи. Указанные методы дают разные результаты для различных стратегий обслуживания.

Под стратегией обслуживания будем понимать порядок выполнения тех или иных операций, связанных с эксплуатацией средств связи. Ниже рассматриваются следующие группы стратегий обслуживания: а) профилактическое обслуживание систем; б) ремонтные работы.

Первая группа стратегий обслуживания рассматривается в разд. 9.2, а вторая — в разд. 9.3.

Математические методы, используемые в данной главе, уже знакомы читателю по предыдущим разделам книги и в основном не требуют каких-либо дополнительных пояснений. В этой главе не рассматриваются вопросы оптимального обнаружения и отыскания неисправностей. Интересующиеся могут обратиться, например, к [70].

## 9.2. СТРАТЕГИИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ

Под профилактическим обслуживанием систем здесь понимается совокупность следующих работ: а) контроль исправности; б) проверка исправности; в) замена элементов и устройств.

Контроль исправности осуществляется с целью обнаружения отказов, как правило, без нарушения нормальной работы контролируемых элементов, устройств, систем. Существуют две основные стратегии контроля исправности - непрерывный и периодический. При непрерывном контроле в рассматриваемую систему включаются специальные устройства, предназначенные для обнаружения и индикации отказов. Если обозначить интенсивность отказов контролируемой системы через $\lambda_1$, а интенсивность отказов системы контроля $\lambda_2$, то общий коэффициент готовности будет равен:

$$K_{\text{г}} = \frac{\nu_1\nu_2}{\nu_1\nu_2 + \lambda_1\nu_2 + \lambda_2\nu_1}, \qquad (9.1)$$

где $\nu_1$; $\nu_2$ — интенсивность ремонтов соответственно для контролируемой системы и системы контроля.

Если система контроля идеальна, то получаем известное выражение для коэффициента готовности:

$$K_{\text{г}} = \frac{\nu_1}{\nu_1 + \lambda_1}. \qquad (9.2)$$

Формулу (9.1) можно представить несколько в ином виде, если числитель и знаменатель разделить на $\nu_1\nu_2$:

$$K_{\text{г}} = \frac{1}{1 + \dfrac{\lambda_1}{\nu_1} + \dfrac{\lambda_2}{\nu_2}}. \qquad (9.1')$$

Отсюда наглядно видно, что величина коэффициента готовности целиком определяется отношениями $\lambda_1/\nu_1$ и $\lambda_2/\nu_2$. Поэтому если величина коэффициента готовности задана, то область возможных решений по организации контроля исправности (выбор контролирующей и контролируемых систем исходя из интенсивности отказов или определение периодичности профилактических работ) может быть установлена, если рассматривать зависимость между $\lambda_1/\nu_1$ и $\lambda_2/\nu_2$ (рис. 9.1). Если заданы и коэффициент готовности и отношение $\lambda_1/\nu_1$, то ф-ла (9.1') дает возможность непосредственно выбрать систему контроля по величине отношения $\lambda_2/\nu_2$. Наоборот, при известных коэффициенте готовности и отношении $\lambda_2/\nu_2$ можно определить по величине $\lambda_1/\nu_1$, какие системы может контролировать данная система контроля.

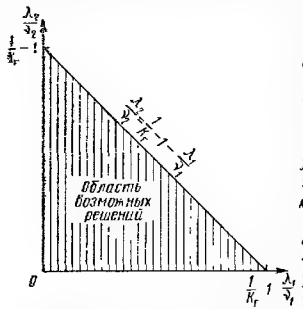



Рис. 9.1. Область возможных решений организации непрерывного контроля исправности при заданной величине коэффициента готовности системы в целом (контролируемой системы и системы контроля)

При организации периодического контроля затраты на его осуществление уменьшаются, так как уменьшается стоимость системы контроля. Однако если контроль системы производится через $T$ часов, то отказ системы, появившийся за отрезок времени между двумя соседними проверками, будет оставаться некоторое время (меньше, чем $T$) неустраненным. Ожидаемое время простоя контролируемой системы между проверками можно определить как

$$T_{\text{к}} = \int_0^T (T - t) f(t)\, dT, \qquad (9.3)$$

где $T_{\text{к}}$ — ожидаемое время простоя системы от момента возникновения отказа до момента проверки при условии, что устранение

отказа производится практически мгновенно; $f(t)$ — функция плотности вероятности появления отказа системы.

Приняв, как и раньше, $f(t)=\lambda e^{-\lambda_1 t}$ имеем

$$T_к = T - \frac{1}{\lambda_1}(1 - e^{-\lambda_1 T}). \tag{9.4}$$

При сделанном выше допущении о том, что устранение повреждения производится в очень маленький промежуток времени, которым можно пренебречь по сравнению с величиной $T_к$, получим, что за $W$ проверок ожидаемое время простоя будет равно

$$T_{к\,об} = \sum_{i=1}^{W} T_{n_i} = WT_n. \tag{9.5}$$

Отсюда можно определить величину коэффициента готовности по формуле

$$K_г = \frac{T_0}{T_0 + T_{к\,об}}, \tag{9.6}$$

где $T_0$ — время нормальной работы системы.

Если величина $T_к$ регламентирована, то из ф-лы (9.4) можно найти соответствующую ей величину $T$ — интервал между соседними проверками ($\lambda_1=\text{const}$).

Выбор оптимальной стратегии контроля (непрерывной или дискретной) производится в результате соответствующего анализа по величине затрат (здесь обычно преимущество имеет дискретная система контроля) и по величине коэффициента готовности (непрерывная система обладает большей величиной этого коэффициента).

Проверка исправности производится для подтверждения работоспособности аппаратуры (устройства, элемента, системы) путем проведения комплекса специальных работ (измерений, контрольных испытаний и т. д.). При проверке исправности аппаратура отключается от системы, в составе которой она функционирует в обычное время. Следовательно, чем чаще осуществляется проверка, тем большее время контролируемая система простаивает. Наоборот, чем реже проверки, тем меньше информации у обслуживающего персонала о работоспособности данной аппаратуры, тем выше вероятность появления отказов и ее простоя в процессе ремонтирования. Поэтому имеется определенный оптимум периодичности проверок.

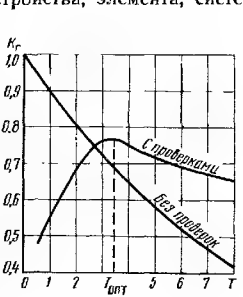



Рис. 9.2. Коэффициент готовности системы как функция периодичности между проверками

Будем считать, что время, требующееся для проверки, вне за-

висимости от того, когда она проводится, является величиной постоянной. Обозначим ее через $T_{пр}$. На рис. 9.2 показана зависимость коэффициента готовности системы от периодичности осуществления проверок. При чрезмерно частых проверках эффекта не достигается, так как контролируемая аппаратура много простаивает при выполнении проверок. Затем коэффициент готовности возрастает до максимума вследствие положительного влияния результатов проверок на уменьшение потока отказов в период между проверками. Уменьшение коэффициента готовности при дальнейшем увеличении времени между проверками $T$ объясняется возрастанием вероятности появления отказов в этот промежуток времени. Если распределение времени появления отказа системы экспоненциально, то готовность, представляющая собой площадь, ограниченную кривой готовности, усредненной по одному циклу проверки, равна

$$K_1(T) = \frac{1}{T}\int_0^{T+T_{пр}} e^{-\lambda_1 t}\,dt = \frac{1}{\lambda_1 T}\left|1 - e^{-\lambda_1 (T-T_{пр})}\right|.$$

Для определения максимума этой функции приравниваем ее производную нулю:

$$-\frac{1}{\lambda_1 T^2} + \frac{1}{\lambda_1 T^2} e^{\lambda_1 T} e^{\lambda_1 T_{пр}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 T} e^{\lambda_1 T} e^{\lambda_1 T_{пр}} = 0.$$

Отсюда получаем уравнение

$$(1 + \lambda_1 T) e^{-\lambda_1 T} = e^{\lambda_1 T_{пр}}.$$

При $\lambda_1 T \ll 1$ допустимо применить разложение:

$$e^{-\lambda_1 T} \approx 1 - \lambda_1 T.$$

Ошибка при этом не будет превышать величины $\lambda_1^2 T^2/2$. Если такая ошибка допустима, то

$$(1 + \lambda_1 T)(1 - \lambda_1 T) = e^{\lambda_1 T_{пр}}.$$

Отсюда

$$1 - \lambda_1^2 T^2 = e^{-\lambda_1 T_{пр}}$$

и окончательно

$$T_{макс} = \frac{1}{\lambda_1}\sqrt{1 - e^{-\lambda_1 T_{пр}}}.$$

Так как $T \gg T_{пр}$, то разложение $1 - e^{-\lambda_1 T_{пр}} = \lambda_1 T_{пр}$ дает еще большую точность, чем разложение $e^{-\lambda_1 T}$. Поэтому можно записать:

$$T_{макс} = \sqrt{\frac{T_{пр}}{\lambda_1}}.$$

Замена элементов и устройств должна производиться в оптимальные сроки. Если эта замена производится часто, то требуемая долговечность работы заменяемых устройств и элементов не обеспечивается. Вследствие этого возрастут затраты на запасные части, полуфабрикаты, увеличится централизованный ремонтный фонд, а вместе с ними — и общие эксплуатационные расходы. Кроме того, при частых заменах возрастают простои оборудования из-за приработочных отказов. Наоборот, если замена производится редко, то увеличатся простои оборудования в результате действия износовых отказов, хотя количество запасных изделий в данном случае требуется значительно меньше.

Как указывалось выше, для большинства систем, устройств и элементов в период нормальной работы сохраняется постоянство интенсивности отказов во времени. Поэтому профилактическая замена в этот период не оправдывает себя, так как вероятность отказа в будущем не меняется от того, заменят ли его новым элементом или нет. Затраты при такой замене возрастают, поскольку заменяемый элемент не обеспечит требуемой долговечности работы, а коэффициент готовности уменьшается за счет приработочных отказов. Следовательно, все замены должны производиться только в период износа и вопрос состоит в том, чтобы определить, при какой степени износа эти замены должны осуществляться.

Рассмотрим три простейших стратегии замен:

1) замены производятся только при появлении отказов;

2) замены производятся в моменты времени $t_2$, $2t_2$, $3t_2$... независимо от возраста используемых элементов;

3) замены производятся тогда, когда продолжительность работы элемента достигнет $t_3$.

При второй и третьей стратегиях при появлении отказа в период между заменами отказавший элемент также заменяется.

Указанные стратегии сравниваются по критерию средней стоимости замен на единицу времени. Обозначим среднюю стоимость замены по первой стратегии через $c_1$, по второй — через $c_2$ и по третьей — через $c_3$. В соответствии со сделанным выше замечанием стратегии *2* и *3* могут быть эффективны только в период износа. С другой стороны, третья стратегия предпочтительнее второй, так как, следуя последней, можно произвести планируемую замену только что введенного в употребление элемента. Однако вторую стратегию можно улучшить, например, условием, что почти новые элементы не заменяются.

Средняя стоимость на единицу времени работы системы при первой стратегии $C_1$ равна:

$$C_1 = \frac{c_1}{T_0}, \tag{9.7}$$

где $T_0$ — средняя продолжительность безотказной работы; $c_1$ — средняя стоимость замены в порядке обслуживания.

Средняя стоимость на единицу времени работы системы при второй стратегии $C_2$ равна:

$$C_2 = \frac{c_2 + c_1 H(t_2)}{t_2}, \tag{9.8}$$

где $H(t_2)$ — функция восстановления, определяющая число замен отказавших элементов за время $t_2$ - период между заменами; $c_2$ — средняя стоимость планируемой замены ($c_2 < c_1$).

Как показано в [71], при $t_2 \to \infty$ имеет место предельное соотношение

$$H(t_2) = \frac{t_2}{T_0} + \frac{\sigma^2(T_0) - T_0^2}{2T_0^2}, \tag{9.9}$$

где $\sigma^2(T_0)$ — дисперсия средней продолжительности безотказной работы. Отсюда

$$C_2 = \frac{c_1}{T_0} + \frac{1}{t_2}\left[c_2 - \frac{c_1(\sigma^2(T_0) - T_0^2)}{2T_0^2}\right]. \tag{9.10}$$

Сравнивая (9.10) с (9.7), получим, что вторая стратегия предпочтительнее первой, если выдерживается неравенство

$$\frac{c_2}{c_1} < \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\sigma^2(T_0)}{T_0^2}\right). \tag{9.11}$$

Оптимальное значение величины $t_2$ может быть получено при анализе ф-лы (9.10). Хорошее приближение к оптимальному будет достигаться при тех значениях $t_2$, для которых $H(t_2)$ намного меньше своего предельного значения (9.9). Средняя продолжительность времени, в течение которого при третьей стратегии используется элемент, равна

$$T_3 = \int_0^{t_3} F(t)\,dt, \tag{9.12}$$

где $F(t)$ — закон распределения длительности безотказной работы элемента.

Использование данного элемента закончится планируемой заменой с вероятностью $F(t_3)$, и средняя стоимость на единицу времени при третьей стратегии равна

$$C_3 = \frac{c_1 - (c_1 - c_2)F(t_3)}{T_3}. \tag{9.13}$$

Анализируя это выражение, можно отыскать оптимальное значение $t_3$. Достаточное условие предпочтительности третьей стратегии перед первой состоит в том, чтобы

$$T_0 P(t) > \frac{c_1}{c_1 - c_2}, \tag{9.14}$$

где $P(t)$ — предельное значение вероятности отказа.

Кроме рассмотренных, имеются и другие стратегии замен. В тех случаях, когда стоимость замен в зависимости от принимаемых стратегий установить не удается, в качестве критерия используется величина коэффициента готовности.

Коэффициент готовности можно увеличить за счет ремонтного времени для целей профилактики. В этом случае профилактическое обслуживание приводит к уменьшению числа отказов за счет уменьшения времени работы каждого элемента. Такая профилактика оправдывается, если интенсивность отказов элемента растет со временем и время замены исправных элементов меньше времени замены отказавших элементов.

## 9.3. СТРАТЕГИИ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ

Существует большое количество различных стратегий ремонтного обслуживания систем. В частности, ремонт может начинаться сразу же после выхода устройства (элемента) из строя или, наоборот, только после того, как накопится определенное количество отказавших образцов аппаратуры. Ремонт может осуществляться несколькими бригадами, специализирующимися либо на определенных видах работ, либо на определенных типах аппаратуры. Специализированные работы могут выполняться и отдельными рабочими в составе одной бригады. Наконец, ремонт может быть либо централизован, т. е. выполняться в центральных мастерских специально выделенным для этого ремонтным персоналом, либо децентрализован, т. е. производиться на месте работы аппаратуры. Может оказаться эффективным и комбинированный вариант - часть аппаратуры ремонтируется централизованно, а часть — децентрализованно. При ремонте вышедшее из строя оборудование может быть заменено новым из централизованного ремонтного фонда, имеющегося в цехе связи предприятия, а может иметь место простой средств на весь период восстановления утраченных аппаратурой характеристик.

В данном разделе рассматривается только один вопрос — определение границ эффективности централизованного и децентрализованного ремонтов. Несложно составить методику расчета объема централизованного ремонтного фонда, пользуясь которой можно установить целесообразность замены отказавшей аппаратуры исправной на период ремонта. Вопросы специализации ремонтных работ сводятся к решению известными математическими методами задач размещения.

Итак, $m$ однотипных видов оборудования связи должно работать на расстоянии $l$ км от центральных ремонтных мастерских. Вероятность того, что одно средство без поломки сможет проработать $t$ часов, равна $e^{-\lambda t}$. Время работы в центральных ремонтных мастерских и на месте подчинено показательному закону. Среднее время ремонта равно соответственно — в центральных мас-

терских $1/\nu_1$ ч. на месте $1/\nu_0$ ч. Скорость доставки неисправного средства связи от места его работы до центральных мастерских — $v$ км/ч. Требуется определить, при каком удалении места работы средств связи от центральных ремонтных мастерских выгоднее организовать ремонт на месте, а при каком доставлять машины в центральные ремонтные мастерские цеха связи промышленного предприятия. При ремонте на месте одновременно может ремонтироваться $n_0$ средств. В том случае, когда потребуется ремонтировать больше $n_0$ средств, остальные, вышедшие из строя, будут ждать своей очереди. За счет этого будут иметь место потери времени на ожидание начала ремонта.

При ремонте в центральных мастерских затраты рабочего времени (кроме самого ремонта) будут связаны только с доставкой средства связи на центральную станцию и обратно. Другими словами, принимается, что мощность центральных мастерских такова, что ремонт очередного неисправного средства начинается немедленно в момент его доставки.

Для ответа на поставленный вопрос необходимо найти среднее время ожидания обслуживания на месте и время, необходимое для осуществления централизованного ремонта. Предпочтение должно отдаваться тому способу, при котором простой оборудования будет меньше. Если подходить к решению этой задачи только с точки зрения материальных затрат, то, как правило, ремонт вышедшей из строя техники на месте обходится дешевле, поскольку стоимости ремонта примерно одинаковы. Стоимость двойной перевозки неисправного средства при централизованном ремонте имеет значительную величину. Однако в тех случаях, когда простои недопустимы, решающее значение имеет их продолжительность в зависимости от стратегии ремонта. Очевидно, что если расстояние от места до центральных мастерских мало, то выгоднее использовать централизованную организацию ремонта, как более мощную, а если очень велико, то лучше ремонтировать на месте из-за больших затрат времени на перевозки. Следовательно, существует граница, за которой централизованный ремонт уже не будет давать необходимого эффекта. Найдем ее.

Время, затрачиваемое на доставку неисправного средства в центральные мастерские и обратно, равно

$$T_v = \frac{2l}{v}. \tag{9.15}$$

Найдем среднее время ожидания начала обслуживания при ремонте на месте. Математическое ожидание длины очереди

$$M_2 = \sum_{k=n_2+1}^{m} (k - n_2)\, p_k, \tag{9.16}$$

где

$$p_k = \frac{m!}{n_2^{k-n_2} n_2! (m-k)!} \left(\frac{\lambda}{\nu_3}\right)^k p_0; \tag{9.17}$$

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n_2} \frac{m!}{k!\,(m-k)!}\left(\frac{\lambda}{\nu_2}\right)^k + \sum_{k=n_2+1}^{m} \frac{m!}{n_2^{k-n_2}\,n_2!\,(m-k)!}\left(\frac{\lambda}{\nu_2}\right)^k} \qquad (9.18)$$

Коэффициент простоя средства связи $M_2/m$. Среднее время простоя одного средства в ожидании начала ремонта на месте, отнесенное к одному ремонту:

$$T_2 = \frac{M_2}{m\lambda}. \qquad (9.19)$$

При централизованном ремонте среднее время простоя одного средства

$$T_1 = T_v + \frac{1}{\nu_1} = \frac{2l}{v} + \frac{1}{\nu_1}. \qquad (9.20)$$

Если $T_2 > T_1$, то выгоден централизованный ремонт. Следовательно, в этом случае должно соблюдаться условие:

$$\frac{M_2}{m\lambda} \geqslant \frac{2l}{v} + \frac{1}{\nu_1}; \qquad (9.21)$$

$$\frac{M_2}{m\lambda} - \frac{1}{\nu_1} \geqslant \frac{2l}{v}$$

или, окончательно,

$$\frac{v}{2}\left[\frac{M_2}{m\lambda} - \frac{1}{\nu_1}\right] \geqslant l. \qquad (9.22)$$

Таким образом, искомая величина $l$ зависит от числа средств $(m)$, их интенсивности отказов $(\lambda)$, средних продолжительностей ремонта $(1/\nu_2$ и $1/\nu_1)$, количества рабочих мест при ремонте на месте $(n_2)$.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Абезгауз Г. Г. и др. Справочник по вероятностным расчетам. М., Воениздат, 1966. 407 с.
2. Аваков Р. А. и др. Основы телефонии и теории телефонных сообщений. М., «Связь», 1969. 304 с.
3. Автоматизация производства и промышленная электроника «Советская энциклопедия», тт. 1—4. 1962—1965.
4. Аджемов С. А. Об оценке схем построения сети по надежности и стоимости. — «Сб. научных трудов ЦНИИС», вып. 2, 1961.
5. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М., «Энергия», 1965. 360 с.
6. Базовский И. Надежность: теория и практика. М., «Мир», 1965. 373 с.
7. Балакин А. С., Матлин Г. М., Яхнис Л. Н. Связь на промышленных предприятиях. Изд. 2. М., «Связь», 1971. 455 с.
8. Балакин А. С., Еременко С. А. Опыт использования промышленного телевидения в черной металлургии для технологических и диспетчерских целей. «Черметинформация», 1967. 61 с.
9. Барсук В. А., Губин Н. М. Математические методы планирования и управления в хозяйстве связи. М., «Связь», 1966. 340 с.
10. Башарин Г. П., Харкевич А. Д., Шнепс М. А. Массовое обслуживание в телефонии. М., «Наука», 1968. 246 с.
11. Беллман Р. Динамическое программирование. М., ИЛ, 1960, 400 с.
12. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М., «Наука», 1965. 458 с.
13. Берг А. И. Кибернетика — наука об оптимальном управлении. М., «Энергия», 1964. 64 с.
14. Бенеш В. Э. Математические основы теории телефонных сообщений. М., «Связь», 1968. 291 с.
15. Берж К. Теория графов и ее применение. М., ИЛ, 1962, 319 с.
16. Бесконечные антагонистические игры. Физматгиз, 1963. 503 с.
17. Бизин П. С., Верещагин Г. П., Рольник М. А. Шахтная связь. М., «Недра», 1970. 166 с.
18. Бир Ст. Кибернетика и управление производством. М., «Наука», 1965. 392 с.
19. Богданов Г. Н. Новый комплекс промышленных телевизионных установок для предприятий черной металлургии. «Черметинформация», 1970. 30 с.
20. Большев Г. Н., Матлин Г. М. Диспетчеризация в строительстве. М., Стройиздат, 1973. 128 с.
21. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М., «Наука», 1965. 464 с.
22. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М., Физматгиз, 1960. 392 с.
23. Буслеико Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний и его реализация на цифровых вычислительных машинах. М., Физматгиз, 1961. 226 с.
24. Бухман Е. Н., Подгородецкий Н. А. Статистика связи. М., Связьиздат, 1948. 303 с.
25. Васильев Б. В., Козлов Б. А., Ткаченко Л. Г. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. М., «Советское радио», 1964. 368 с.
26. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М., «Советское радио», 1964. 388 с.
27. Вентцель Е. С. Элементы динамического программирования. М., «Наука», 1964. 176 с.
28. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Изд. 4, М., «Наука», 1969, 576 с.

29 Виленкин Н. Я. Комбинаторика. М., «Наука», 1969. 328 с.
30 Винер Н. Кибернетика. М., «Советское радио», 1958. 215 с.
31. Винер Н. Кибернетика и общество. М., ИЛ, 1958, 200 с.
32. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов. М., «Советское радио», 1966. 166 с.
33. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. М., Физматгиз, 1962.
34. Глушков В. М. Введение в кибернетику. Киев. Изд-во АН УССР, 1964. 324 с.
35. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М., «Наука», 1965. 524 с.
36. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. Изд. 5, М., «Наука», 1969. 400 с.
37. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М., «Наука», 1966. 432 с
38. Голдман С. Теория информации. М., ИЛ, 1957, 446 с.
39. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Новые направления в линейном программировании. М., «Советское радио», 1966. 524 с.
40. Гроднев И. И. и др. Кабельные линии связи. М., Связьиздат, 1960. 495 с.
41. Гроднев И. И., Курбатов П. Д. Линейные сооружения связи. М., «Связь», 1968. 532 с.
42. Гроднев И. И., Кулешов В. Н., Соколов В. В. Кабельные линии связи. М., Связьиздат, 1960. 495 с.
43. Гуд Г., Макол Р. Введение в проектирование больших систем. М., «Советское радио», 1962. 383 с.
44. Гумеля А. Н., Шварцман В. О. Электрические характеристики кабельных и воздушных линий связи. М., «Связь», 1966. 207 с.
45. Гуревич А. С., Курбатов П. Д. Надежность кабелей связи. М., «Связь», 1968. 136 с.
46. Гуров В. С. и др. Основы передачи данных по проводным каналам связи. М., «Связь», 1964. 311 с.
47. Давыдов Г. Б., Рогинский В. Н. Проблемы построения сетей связи. — В сб.: «Информационные сети и коммутация». М., «Наука», 1968.
48. Дрейзен И. Г. Электроакустика и звуковое вещание. М., Связьиздат, 1961. 544 с.
49. Дрешер М. Стратегические игры. Теория и приложения. М., «Советское радио», 1964. 352 с.
50. Другов В. М., Дранкин Д. М. Телефонные усилители мостового типа. М., «Связь», 1965. 49 с.
51. Думлер С. А. Управление производством и кибернетика. М., «Машиностроение», 1969. 424 с.
52. Гнеденко-Барковский И. В., Смирнов Н. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М., Гостехиздат, 1955, 556 с.
53. Жданов И. Н., Кучерявый Е. И. Построение ГТС. М., «Связь», 1972. 136 с.
54. Жданов И. Н. Районирование городских телефонных сетей. — «Сб. научных работ по проводной связи». Вып. 5, М., Изд. АН СССР, 1956.
55. Электрическая связь на промышленных предприятиях. Справочник. М., «Связь», 1972, 512 с.
56. Захаров Г. П. Эффективность систем связи. — «Электросвязь», 1967, № 12, с. 33—41.
57. Захаров Г. П., Вараксин Н. П. Расчет количества каналов связи при обслуживании с ожиданием. М., «Связь», 1967. 304 с.
58. Звенигородский И. С., Карасин Г. С. Сооружение и эксплуатация средств внутриобъектной связи на электростанциях и подстанциях. М., Госэнергоиздат, 1959. 287 с.
59. Иванова О. Н. Электронная коммутация. М., «Связь», 1971. 296 с.
60. Ильин А. А., Пелипенко Л. К. Диспетчерская связь по контактной сети рудников. М., «Недра», 1964. 164 с.
61. Инженерно-технические справочники по электросвязи. Выпуск: «Телегра-

фия», «Электроустановки», «Кабельные и воздушные линии связи». М., «Связь», 1962—1964.
62. Касаткин А. С., Кузьмин И. В. Оценка эффективности автоматизированных систем контроля. М., «Энергия», 1967. 80 с.
63. Кацаланенко В. И. Аппаратура избирательной связи. Изд. 2. М., Трансжелдориздат, 1961. 168 с.
64. Кашарская М. С., Бунина Л. А., Попов С. Т. Громкоговорящая технологическая связь на железнодорожном транспорте. М., «Транспорт», 1966, 218 с.
65. «Кибернетику — на службу коммунизма», т. 1—6. М., «Энергия», 1961—1971.
66. Китов А. И., Криницкий Н. А. Электронные цифровые машины и программирование. М., Физматгиз, 1961. 372 с.
67. Клыков С. А. Телеграфия. М., Связьиздат, 1957
68. Кобринский Н. Е., Трахтенброт Б. А. Введение в теорию конечных автоматов. М., Физматгиз, 1962. 404 с.
69. Кобринский Н. Е., Маталин А. М. Экономико математические модели в планировании. М., «Экономика», 1968, 111 с.
70. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности. М., «Советское радио», 1966. 432 с.
71. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. М., «Советское радио», 1966. 300 с.
72. Кокшарский Н. С. Технико-экономические обоснования при проектировании средств и сооружений проводной связи. М., «Связь», 1965. 190 с.
73. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количества информации». — В кн. «Проблемы передачи информации», 1965, т. 1, вып. 1.
74. Корнышев Ю. Н. Расчет коллективных линий. — «Электросвязь», 1969, № 7, с. 33—43.
75. Корнышев Ю. Н. Расчет полнодоступной коммутационной схемы с повторными вызовами. — «Электросвязь», 1969, № 11, с. 65—72.
76. Корнышев Ю. Н. Построение схем равномерных неполнодоступных включений. — «Электросвязь», 1971, № 7, с. 35—45.
77. Королев М. А. Обработка экономической информации на ЭВМ. — «Экономика», 2-е изд., 1965. 286 с.
78. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. М., «Мир», 1965. 30 с.
79. Крючков В. И., Маталин Г. М. Основные принципы организации оперативной связи в автоматизированных системах управления строительства. — «Сб. материалов и информации Постоянной Комиссии СЭВ по строительству». Краков, 1970, с. 117 -131
80. Курпосова Н. И., Пшеничников А. П. Определение сроков прокладки и емкости кабелей на направлениях межстанционных связей городских телефонных сетей. — «Электросвязь», 1969, № 4, с. 73 -77.
81. Лебедев Д. С., Гармаш В. А. О возможности увеличения скорости передачи телеграфных сообщений. — «Электросвязь», 1958, № 1.
82. Лившиц Б. С., Фидлин Я. В., Харкевич А. Д. Теория телефонных и телеграфных сообщений. М., «Связь», 1971.
83. Лившиц Б. С., Фидлин Я. В. Системы массового обслуживания с конечным числом источников. М., «Связь», 1968. 168 с.
84. Лившиц Б. С., Фидлин Я. В. Анализ качества технических решений в АТС. — «Электросвязь», 1969, № 3, с. 8 –19, № 5, с. 44—52.
85. Малиновский С. Т. Неравномерность нагрузки на телеграфной сети общего пользования. — «Электросвязь», 1969, № 10, с. 55—62.
86. Малиновский С. Т. Продолжительность передачи телеграмм и времени обслуживания вызовов в системе прямых соединений. — «Электросвязь», 1969, № 4, с. 45—52.
87. Малиновский С. Т., Хусид Г. Х., Кожина Г. И. Характер потока поступления вызовов на каналы автоматических телеграфных станций. — «Электросвязь», 1971, № 5, с. 31—36.

88 Макарский Ю. И. Потоки информации на предприятии и ее обработка. — «Экономика», 1967. 48 с.
89. Максимов Г. З., Пшеничников А. Л. Телефонная нагрузка местных сетей связи. М., «Связь», 1969. 150 с.
90. Матлин А. М., Матлин Г. М. Эффективность функционирования сетей производственной связи. — «Электросвязь». 1970, № 12, с. 54—60.
91. Матлин Г. М. Организация производственной громкоговорящей связи с центральными усилителями в строительстве. — «Научно-техническая информация ЦИНИС», 1968, № 9, с. 43—46.
92. Матлин Г. М. Оптимальная загрузка радиосетей в строительстве. — «Научно-техническая информация ЦИНИС», 1968, № 7, с. 58—61.
93 Матлин Г. М. Исследование потоков информации, передаваемой средствами связи в строительстве крупного города. — «Вычислительная и организационная техника в строительстве и проектировании», 1968, с. 45—47.
94. Матлин Г. М., Эде К. А. Объем систематизированной информации в существующих системах управления строительством крупных городов. — «Вычислительная и организационная техника в строительстве и проектировании», 1968, с. 37—42.
95. Матричные игры. Под ред. Воробьева Н. Н. М., Физматгиз, 1961. 280 с.
96. Мархай Е. В. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. М., Связьиздат, 1953. 424 с.
97 Мархай Е. В., Рогинский В. Н, Харкевич А. Д. Автоматическая телефония. М., «Связьиздат», 1960. 536 с.
98. **Метельский Г. Б., Кармазов М. В. Автоматическая телефония. М., «Связь», 1963. 367 с.**
99. Метельский Г. Б. Координатные АТС. М., Связьиздат, 1961. 190 с.
100. Меднхов А. Н. Ориентированные графы и конечные автоматы. М., «Наука», 1971.
101. Методика обследования потоков экономической информации в строительстве. Ч. 1—3. Гипротис Госстроя СССР, 1967.
102. Моль А. Теория информации и эстетическое восприятие. М., «Мир», 1966, 351 с.
103. Нартов Ю. А. Радиоэлектроника в средствах оргтехники. М., «Знание», 1968. 48 с.
104. Наумов Л. А., Чанцов С. Д. Курс телеграфии Ч. 2, М., Связьиздат, 1961. 295 с.
105. Нестерова А. В. Определение оптимального числа узловых районов на ГТС. — «Электросвязь», 1971, № 1, с. 58—61.
106. Новиков В. В. и др. Телеграфия. Ч. 1—3. М., Связьиздат, 1956—1960.
107. Номенклатура средств связи, сигнализации и промышленного телевидения. Гипротис Госстроя СССР, 1971. 80 с.
108. Окунев Ю. Б. Опыт оптимального проектирования систем связи. Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1972. 35 с.
109. Опыт применения средств связи для управления производством. «Черметинформация», 1967. 67 с.
110. Оре О. Теория графов. М., «Наука», 1968. 352 с.
111 Основные положения передачи данных по коммутируемым каналам ЕАСС ЦНИИС, 1967.
112. Островский А. С. Двусторонняя громкоговорящая связь на предприятиях и в учреждениях. М., «Связь», 1970, 160 с.
113. Островский А. С. Техника связи, диспетчеризации и оперативного управления в промышленности. М., «Энергия», 1964.
114. Оуэн Г. Теория игр. М., «Мир», 1971. 230 с.
115. Паперпов Л. З. Озвучение открытых пространств. М., Связьиздат, 1963. 104 с.
116. Позиционные игры. М., «Наука», 1967. 522 с.
117. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962. 391 с.
118. Полетаев И. А. Сигнал. М., «Советское радио», 1958. 404 с.

119. Полетаев И. А. Об использовании моделей производства. — В сб.: «Исследования по кибернетике». М., «Советское радио», 1970, с. 87—99.
120. Полетаев И. А. К определению понятия «информация». 1. Семантический аспект. 2. Прагматический аспект. — В сб.: «Исследования по кибернетике». М., «Советское радио», 1970, с. 211—239.
121. Половко А. М. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964. 446 с.
122. Полонник В. С. Прикладное телевидение. М., Госэнергоиздат, 1962. 158 с.
123. Математическая теория оптимальных процессов. М., Физматгиз, 1961. 391 с.
124. Прахов П. В. Организация и планирование телеграфной связи. М., Связьиздат, 1961.
125. Применение электронно-вычислительных машин в управлении производством. М., «Мысль», 1965.
126. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., Физматгиз, 1962. 838 с.
127. Райветт П., Акофф Р. Л. Исследование операций. М., «Мир», 1966. 143 с.
128. Райкин А. Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем. М., «Советское радио», 1967. 264 с.
129. Рекомендации по проектированию диспетчерской связи в строительстве. М., Стройиздат, 1968. 25 с.
130. Рекомендации по разработке и внедрению диспетчеризации в автотранспортном тресте. М., Стройиздат, 1971. 31 с.
131. Рекомендации по разработке и внедрению диспетчеризации в тресте стройМеханизация. М., Стройиздат, 1971. 30 с.
132. Рекомендации по разработке и внедрению диспетчеризации в общестроительном тресте. М., Стройиздат, 1971. 33 с.
133. Риордан Д. Вероятностные системы обслуживания. М., «Связь», 1966. 184 с.
134. Рогинский В. Н. Проблемы доставки информации. — В сб.: «Информация и кибернетика». М., «Наука», 1969, с. 105—125.
135. Рогинский В. Н. Научные основы построения единой системы передачи информации. — «Вестник АН СССР», 1962, № 11.
136. Рогинский В. Н. О проблемах построения сетей передачи информации. — «Известия АН СССР. Отделение технических наук, техническая кибернетика», 1963, № 3.
137. Рогинский В. Н. Проблемы создания сетей доставки информации. — «Электросвязь», 1972, № 3, с. 1—8.
138. Рогинский В. Н. Автоматическая телефонная связь и человек. М., «Знание», 1972. 32 с.
139. Румшинский Л. З. Элементы теории вероятностей. Изд. 4. М., «Наука», 1970. 254 с.
140. Розенберг В. Я., Прохоров А. И. Что такое теория массового обслуживания. Изд. 2, М., «Советское радио», 1965. 256 с.
141. Саати Т. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М., «Советское радио», 1972.
142. Сандлер Д. Техника надежности систем. М., «Наука», 1966. М., 300 с.
143. Сапожков М. А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., Связьиздат, 1963.
144. Основы технической кибернетики. М., «Высшая школа», 1970. 462 с.
145. Сети передачи информации и их автоматизация. М., «Наука», 1965.
146. Синяк В. С., Матлин Г. М. Рациональные способы передачи данных в информационных системах. — «Вычислительная и организационная техника в строительстве и проектировании», 1965, № 3, с. 1—7.
147. Синяк В. С., Матлин Г. М. Информация в автоматизированных системах. — «Вычислительная и организационная техника в строительстве и проектировании», 1968, с. 31—36.
148. Смирнов В. И. Курс высшей математики, тт. 1—4. М., Гостехиздат, 1951.
149. Смирнов К. А. Средства связи в управляющих системах. М., «Знание», 1969. 48 с.

150 Справочник строителя кабельных сооружений связи. М., «Связь», 1968. 800 с.
151. Нестандартные устройства производственной связи. М., «Связь», 1973. 192 с.
152. Телевидение. Общий курс. Изд. 2. М., «Связь», 1965. 464 с.
153. Теория информации и ее приложения. — Сб. переводов, под ред. Харкевича А. А. М., Физматгиз, 1959. 328 с.
154. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. — «Экономическая газета». 1969, № 39.
155. Тинтман Н. И. Методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию. М., «Связь», 1965. 112 с.
156. Ткаченко Л. Г. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. М., «Знание», 1966. 48 с.
157 Томашевский Б. А. и др. Курс телеграфии. М., Связьиздат, 1963. 255 с.
158. Трахтенброт Б. А, Барздинь Я. М Конечные автоматы. Поведение и синтез. М., «Наука», 1970.
159 Ушаков И. А. Эффективность функционирования сложных систем. — В сб.: «О надежности сложных технических систем». М., «Советское радио», 1966.
160. Ушаков И. А Методы решения простейших задач оптимального резервирования. М., «Советское радио», 1969. 176 с.
161. Фант Г. Акустическая теория речеобразования. М., «Наука», 1964. 284 с.
162. Федорцов Б. Ф. Фототелеграфия. Госэнергоиздат, 1960. 354 с.
163. Федорцов Б. Ф. Фототелеграфная техника. М., Воениздат, 1961. 247 с.
164. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М., «Мир», 1967. Т. 1, 498 с.; т. 2, 752 с.
165. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960.
166. Харкевич А. А. О ценности информации. — «Проблемы кибернетики», 1960, № 4.
167. Харкевич А. А. Информация и техника. — «Коммунист», 1962, № 17.
168. Харкевич А. А. Очерки общей теории связи. М., Гостехиздат, 1955. 268 с.
169. Харкевич А. Д. Многоступенчатое построение полнодоступных коммутационных систем. — Доклады АН СССР, 1957, № 6.
170. Хаустейн Г. Методы прогнозирования в социалистической экономике. М., «Прогресс», 1971, 397 с.
171. Хинчин А. Я. Работы по теории массового обслуживания. М., Физматгиз, 1963. 235 с.
172. Шварц Б. А. Двусторонняя индуктивная связь внутри предприятия. — «Электровязь», 1967, № 2.
173. Шварц Б. А. Двусторонняя беспроводная индуктивная связь внутри предприятий. М., «Связь», 1971.
174. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., ИИЛ, 1963. 829 с.
175. Шишонок Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Советское радио», 1964. 551 с.
176. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Советское радио», 1968. 288 с.
177. Шрайер Ф. И. Аппаратура производственной и учрежденческой связи. Справочник. М., «Связь», (готовится к печати).
178. Шрейдер Ю. А. О семантических аспектах теории информации. — в Сб: «Информация и кибернетика». М., «Советское радио», 1967, с. 15—47.
179. Шрейдер Ю. А. Что такое расстояние? М., Физматгиз, 1963. 76 с.
180. Элдин А., Линд Г. Основы теории телетрафика. М., «Связь», 1972. 200 с.
181. Эшби Р. У. Введение в кибернетику. М., ИЛ, 1959, 439 с.
182. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г. Линейное программирование. Теория, методы и приложения. М., «Наука», 1969. 424 с.
183. Яглом А. М., Яглом И. М. Вероятность и информация. Изд. 2. М., Физматгиз, 1960. 315 с.
184. Янко Я. Математико-статистические таблицы. М., Госстатиздат, 1961. 243 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ


Стр.

Предисловие . . . . . 3

ГЛАВА ПЕРВАЯ

**Система производства и система производственной связи**

1.1. Производство как система . . . . . 5
1.2. Системы управления производством . . . . . 9
1.3. Информация в системах планирования и управления производством 12
1.4. Система связи как техническая база систем управления . . . 29
1.5. Разработка и внедрение систем производственной связи . . . . 36

ГЛАВА ВТОРАЯ

**Краткие сведения о математическом аппарате проектирования систем производственной связи**

2.1. Теория массового обслуживания . . . . . 43
2.2. Теория надежности . . . . . 58
2.3. Регрессионный и корреляционный анализы . . . . . 64
2.4. Прогнозирование . . . . . 76
2.5. Динамическое программирование . . . . . 86

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

**Организация и функционирование систем производственной связи**

3.1. Состав, структура и технические средства систем производственной связи . . . . . 91
3.2. Входящий поток вызовов и время обслуживания . . . . . 94
3.3. Функционирование сетей производственной связи . . . . . 111
3.4. Ожидание в процессе установления соединения . . . . . 125
3.5. Достоверность . . . . . 153
3.6. Надежность . . . . . 167

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

**Эффективность функционирования сетей производственной связи**

4.1. Математические модели доставки информации в различных сетях производственной связи . . . . . 171
4.2. Производственная автоматическая телефонная связь . . . . . 184
4.3. Диспетчерская и директорская связь . . . . . 201
4.4. Автоматизированные системы связи с подвижными абонентами . 212
4.5. Диспетчерская радиотелефонная связь . . . . . 226
4.6. Производственная громкоговорящая связь . . . . . 233
4.7. Телеграфная, фототелеграфная связь и передача данных . . . 238
4.8. Аренда междугородных каналов . . . . . 239

ГЛАВА ПЯТАЯ

**Затраты на строительство и обеспечение функционирования систем производственной связи**


5.1. Экономическая эффективность системы связи и приведенные затраты . 245
5.2. Характеристика и структура капитальных затрат . . . . . 247
5.3 Виды эксплуатационных расходов . . . . . 250
5.4. Количественное выражение функций капитальных и эксплуатационных затрат . . . . . 255
5.5. Капитальные и эксплуатационные затраты на сооружения производственной автоматической телефонной связи . . . . . 260
5.6. Капитальные и эксплуатационные затраты на сооружение диспетчерской и директорской телефонной связи . . . . . 272
5.7. Капитальные и эксплуатационные затраты на сооружение радиосвязи 278
5.8 Капитальные и эксплуатационные затраты на сооружения производственной громкоговорящей связи . . . . . 282
5.9. Капитальные затраты на сооружения промышленного телевидения . 286
5.10. Капитальные затраты на сооружения ручных телефонных станций . 289
5.11. Капитальные и эксплуатационные затраты на сооружения кабельных сетей . . . . . 290


ГЛАВА ШЕСТАЯ

**Определение состава систем производственной связи**


6.1 Постановка задачи . . . . . 303
6.2. Определение требуемого количества средств связи с помощью укрупненных показателей . . . . . 308
6.3. Соотношение между коммутируемыми и некоммутируемыми сетями, проводными и радиосредствами . . . . . 319
6.4. Определение емкости ПАТС корреляционными методами . . . . . 323
6.5. Определение количества установок прямой телефонной связи и устройств производственной громкоговорящей связи корреляционными методами . . . . . 329
6.6. Определение объема строительства сети линейных сооружений корреляционными методами . . . . . 332
6.7 Этапность внедрения средств производственной связи . . . . . 338


ГЛАВА СЕДЬМАЯ

**Выбор типов обрудования и кабелей**


7.1. Выбор типа оборудования ПАТС . . . . . 340
7.2. Выбор типа коммутатора прямой телефонной связи 346
7.3. Выбор типа применяемого кабеля . . . . . 349


ГЛАВА ВОСЬМАЯ

**Оптимизация схем организации связи**


8.1. Выбор способа организации межстанционной связи . . 358
8.2. Определение целесообразности использования ПАТС . . . . . 368
8.3. Узлообразование ПАТС . . . . . 377
8.4. Определение целесообразности применения системы радиотелефонной связи «Алтай» . . . . . 394


ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

**Вопросы эксплуатации систем производственной связи**


9.1. Постановка задачи . . . . . 398
9.2. Стратегии профилактического обслуживания систем . . . . . 399
9.3. Стратегии ремонтного обслуживания систем . . . . . 405
Список литературы . . . . . 408

*Григорий Михайлович Матлин*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СВЯЗИ

Обл. художника *Г. Р. Левина*
Отв. редактор *В. Н. Рогинский*
Редактор *Е. В. Комарова*
Техн. редактор *К. Г. Маркоч*
Корректор *Г. Г. Лев*

Сдано в набор 12/V 1973 г.
Подписано в печ. 22/VIII 1973 г
Форм. бум. 60×90/16 26,0 печ. л. 26,0 усл.-п. л. 28,47 уч.-изд. л. Т-11063 Тираж 8630 экз.
Бумага типографская № 3. Зак. изд. 1410
Цена 1 руб. 65 коп.
Издательство «Связь»,
Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2

Типография издательства «Связь» Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Москва-центр, ул. Кирова, 40. Зак. тип. 137

1р. 65к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«СВЯЗЬ»

# Проектирование систем производственной связи